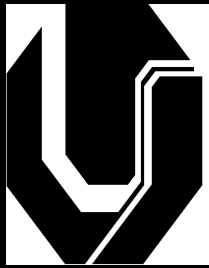


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA



“Modelagem e aplicação de técnicas de controle moderno a sistemas reguladores de velocidade e tensão de máquinas síncronas de pequenas centrais hidroelétricas”

Orientado: Cláudio Homero Ferreira da Silva.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique.

Co-orientador: Eng. MSc. Luiz Renato Gomes (CEMIG).

1. INTRODUÇÃO.

OBJETIVO.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

3. PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

**4. PROJETO DO CONTROLADOR POR:
COLOCAÇÃO DE PÓLOS, CONTROLE
ÓTIMO E MPC.**

5. RESULTADOS.

6. CONCLUSÕES.

INTRODUÇÃO

Introdução

- Pequenas centrais hidroelétricas (PCH's).
- Equipamentos nas instalações, sua influência para a qualidade e principais sistemas.
- Manutenção e Mão-de-obra.
- Envelhecimento das instalações.
- Desenvolvimentos teóricos e melhorias no processo de controle.
- **Justificativas: decisão e flexibilidade.**
- Estudo de técnicas de controle moderno: implantação e avaliação.

OBJETIVO

- Desenvolver um *software* específico para controle de velocidade e tensão de máquinas síncronas a partir da modelagem e da aplicação de técnicas de controle moderno. Aplicado a instalações de pequeno porte via CLP.
- Simulação e validação:
PCH Martins (4 x 2750 KVA).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Revisão Bibliográfica

- Principais necessidades de controle.
- Importância dos sistemas de controle.
- James Watt.
- Minorsky (1922): ED.
- Nyquist (1932): entradas senoidais.
- Hazen(1934): servomecanismos.
- Método da resposta em frequência: Ziegler, Nichols e Bode.
- Evans: método do lugar das raízes.

Revisão Bibliográfica

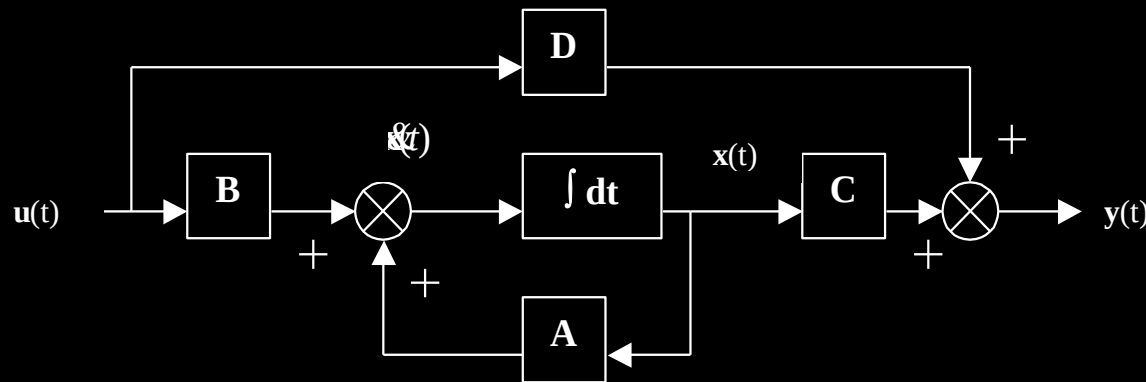
- Descrição dos processos modernos e a teoria de controle.
- Computadores e o controle.
- Ray (1983), SEBORG (1994), HENSON; SEBORG (1997) e HENRIQUE (1999).
- Processos multivariáveis:
performance x robustez.
- Controle Preditivo: “controle perfeito”.
- Observadores de estado e filtros de Kalman.

Revisão Bibliográfica

- Controle adaptativo: variação temporal.
 - Controle não-linear: análise e estabilidade.
 - Inteligência artificial.
 - Evolução da instrumentação.
-
- Sistemas computadorizados e seus problemas.

Revisão Bibliográfica

- Teoria de espaço de estados.
- Controlabilidade, observabilidade e estabilidade.



$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t)$$

- Aplicação de uma lei de controle: Controlabilidade

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$$

- Observadores de estado: Observabilidade.

Revisão Bibliográfica

- Solução da equação de estado homogênea: **Ent.**

$$\mathbf{x}(t) = e^{(\mathbf{A}t)} \mathbf{x}(0) = \gamma(t) \mathbf{x}(0)$$

- Solução da equação de estado completa: **Ent.**

$$\mathbf{x}(t) = \gamma(t - t_o) \mathbf{x}(t_o) + \int_{t_o}^t \gamma(t - v) \mathbf{B} \mathbf{u}(v) dv$$

Revisão Bibliográfica

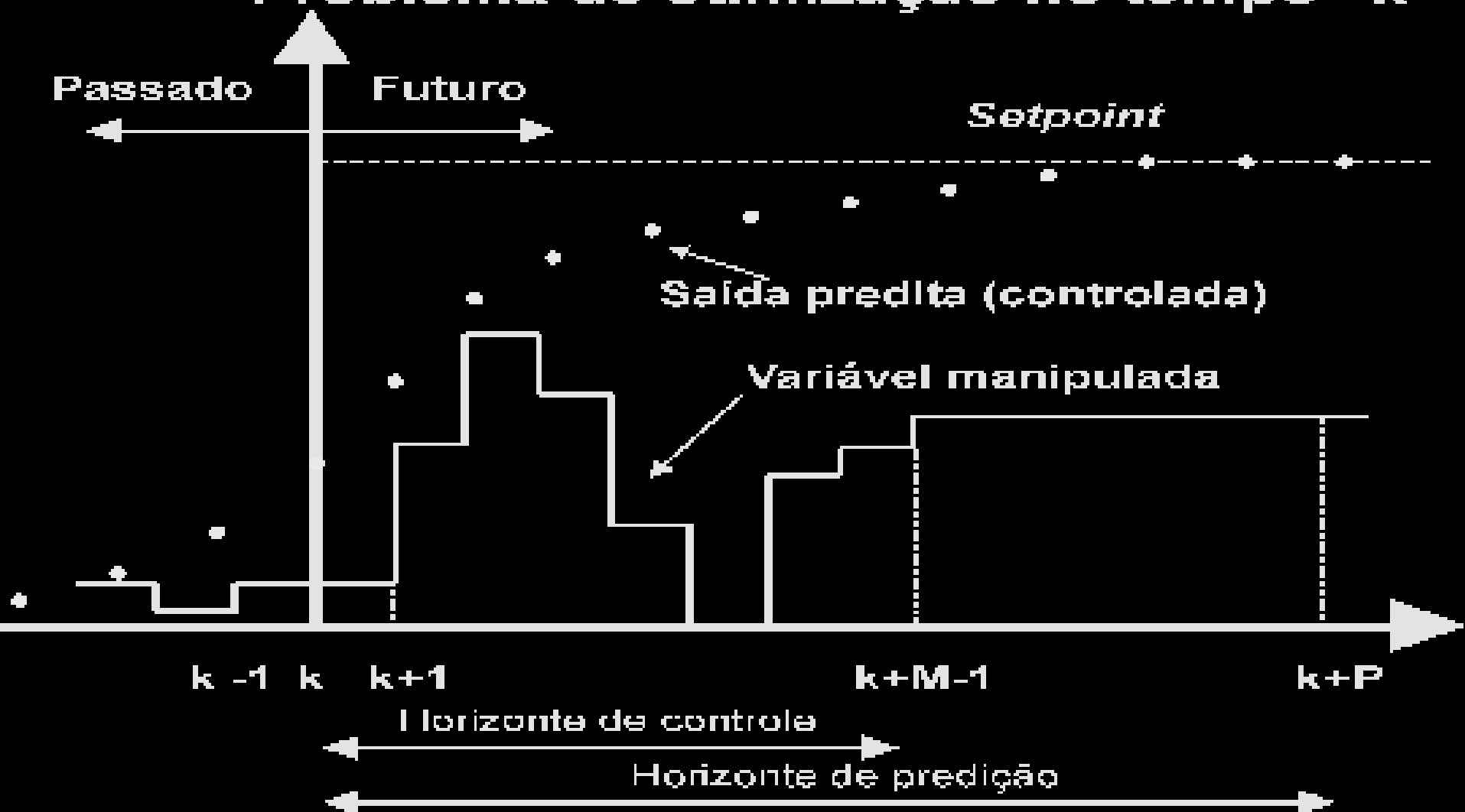
- Horizontes de movimentos.

Algoritmos:

- MAC, DMC: modelo dinâmico explícito.
- LDMC.
- QDMC.
- NLQDMC
- Robustez com MPC.

Revisão Bibliográfica

Problema de otimização no tempo "k"



Revisão Bibliográfica

PROCESSO

- Eletricidade e os gregos.
- Estudo sistemático.
- Maxwell e a unificação da descrição.
- 1873 – Zénobe e a transmissão de energia.
- 1879 – Edison e a central de energia com distribuição.
- 1879 – D. Pedro II e Edison.
- 1889 – Marmelo-0 – 3996 KW
- 1960 – Ministério das Minas e energia.

PROCESSO

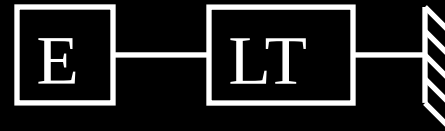
- 1965 – 60 Hz.
 - 1986 – Interligação Sul-Sudeste.
 - 1996 – Criada a ANEEL.
 - 1998 – Criado ONS.
 - 2001 – Criado MGC.
 - A crise e as PCH's.
-
- Constituição dos SEP's.
 - Critérios a serem atendidos.

PROCESSO

- Frequência e o Balanço de Potência ativa.
- Associado com o Regulador de Velocidade.
- **Variações incomuns e limites.**
- Tensão e o Balanço de Potência reativa.
- Associado com o Regulador de Tensão.

PROCESSO

- Escolha da Representação.



Modelagem:

- Levantamento e validação do modelo: GOMES (1992): ensaios e análises.
- Modelo completo por ANDERSON (1982).
- Transformações de Park.
- Modelo em pu.

PROCESSO

Hipóteses simplificadoras:

- Desconsideração dos efeitos dos amortecedores ;
- Desconsideração da resistência de enrolamento do estator;
- Consideração da condição equilibrada nas transformações de Park;
- Consideração dos efeitos da saturação;
- Desconsideração dos efeitos transformadores (derivada de fluxo);
- Desconsideração das variações da frequência elétrica diretamente nas equações de Park.

PROCESSO

Funções de Transferência: Variável Desvio

$$\frac{PM}{Y} = \frac{1-sT_w}{1+s(T_w/2)}$$

$$PEM = K_1\delta + K_2E'_q$$

$$\frac{V_{REF}}{V_T} = K_A \left(K_{AP} + \frac{K_{AI}}{1+sT_A} \right)$$

$$PA = PM - PE$$

$$PE = PCU + PEM = D\omega + K_1\delta + K_2E'_q$$

$$\frac{V_F}{V_{Ref}} = \frac{K_E}{1+T_Es}$$

$$\frac{\omega}{PA} = \frac{1}{2Hs}$$

$$\frac{\omega_{ref}}{Y} = bp + \frac{bt.Tds}{T_d.s + 1}$$

$$\frac{\omega}{PCU} = \frac{1}{D}$$

$$\frac{\delta}{\omega} = \frac{\omega_0}{s}$$

$$\frac{\omega_{ref}}{Y} = \frac{1}{Ts}$$

$$E'_q = \frac{K_3}{T_{do}.K_3.s + 1} V_F - \frac{K_4K_3}{T_{do}.K_3.s + 1} \delta$$

PROCESSO

Equações

$$V_T = K_5 \delta + K_6 E'_q$$

$$SE = A_{\text{sat}} e^{B_{\text{sat}} \cdot V_F}$$

$$\varphi = SE - K_E$$

$$PET = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin \delta = K_1 \delta$$

Parâmetros Linearizados

$$\left. \frac{\partial PET}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_0} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos \delta_0 \cong \frac{V_1 V_2}{X_{12}} = K_1$$

$$K_2 = \frac{\partial TEL}{\partial E'_q}, \delta = \delta_0$$

$$K_3 = \left. \frac{\partial E'_q}{\partial V_F} \right|_{\delta=\delta_0}$$

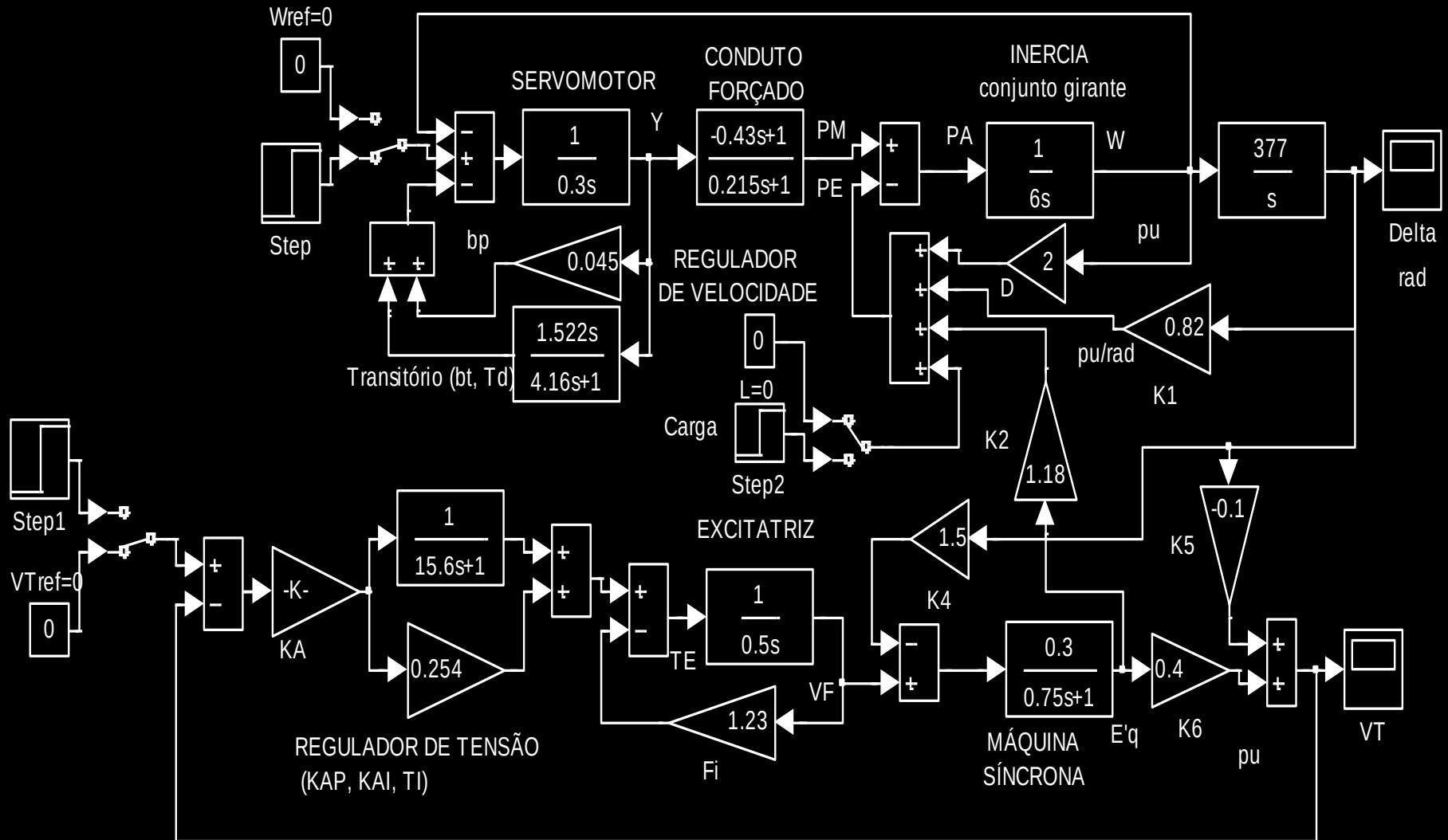
$$K_4 = - \frac{1}{K_3} \left. \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} \right|_{V_F=V_{F0}}$$

$$K_5 = \left. \frac{\partial V_T}{\partial \delta} \right|_{E'_q=E'_{q0}}$$

$$K_6 = \left. \frac{\partial V_T}{\partial E'_q} \right|_{\delta=\delta_0}$$

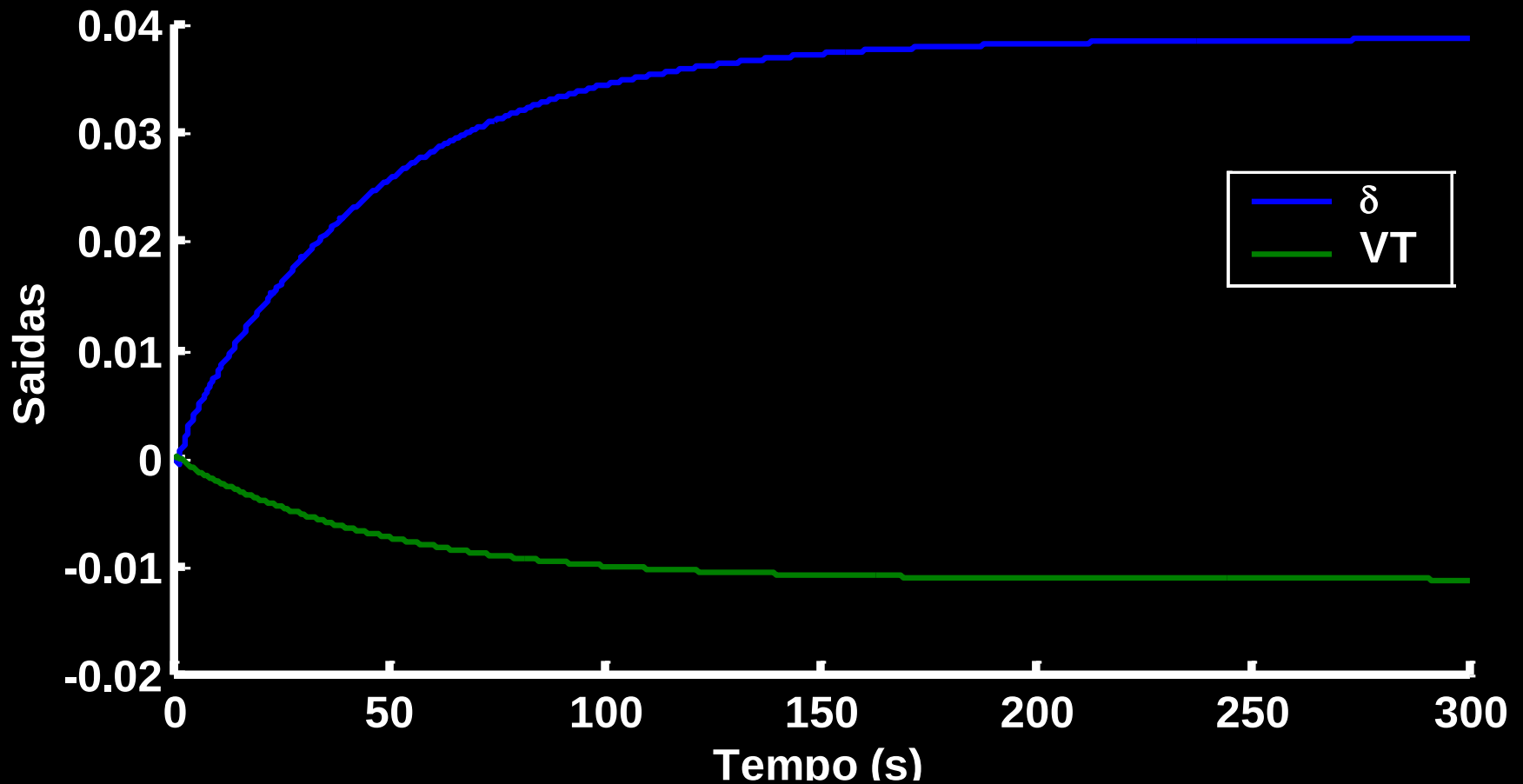
PROCESSO

Diagrama de blocos original.



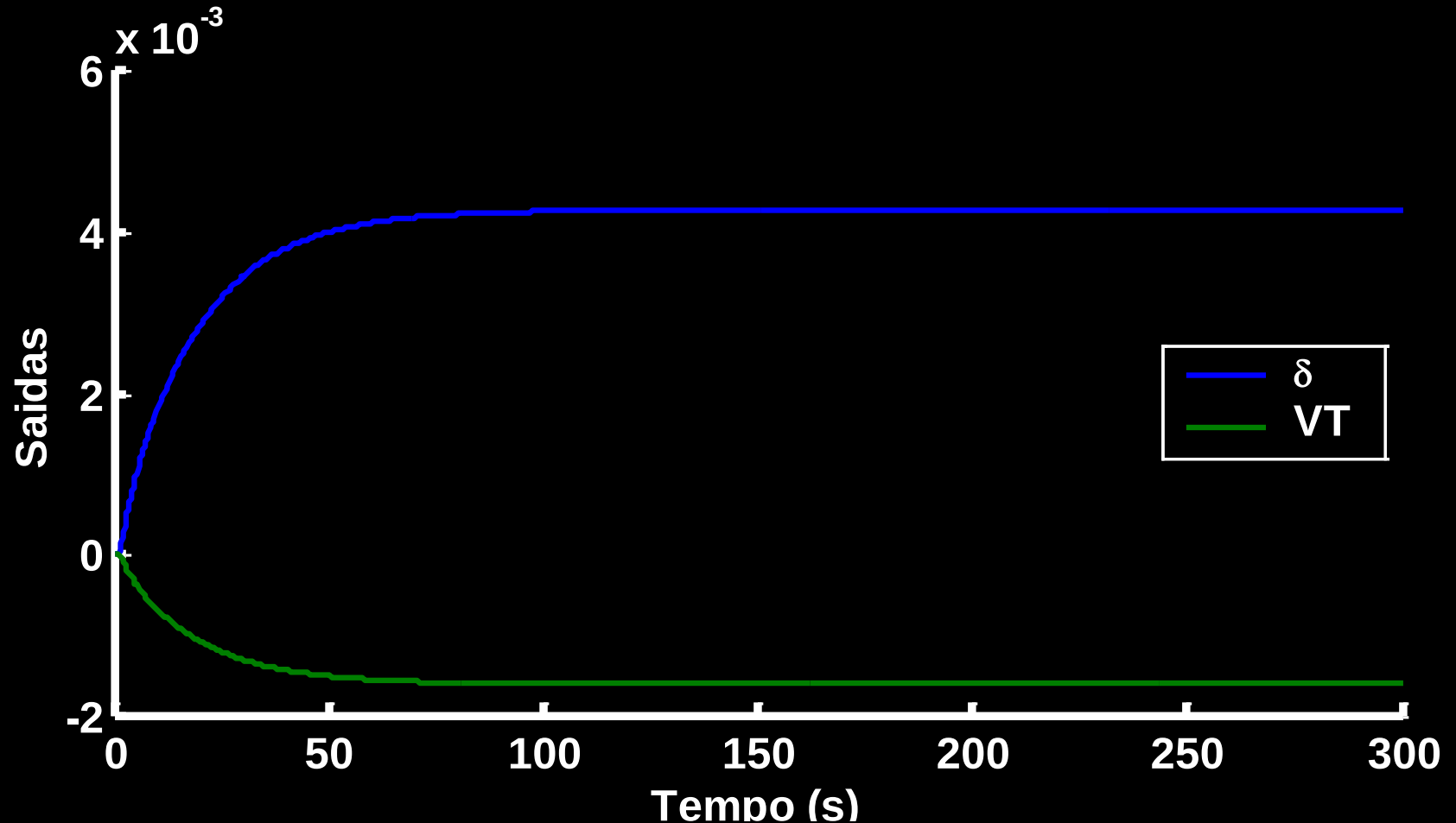
PROCESSO

Resposta do sistema ao degrau de 0.00045
no laço de velocidade.



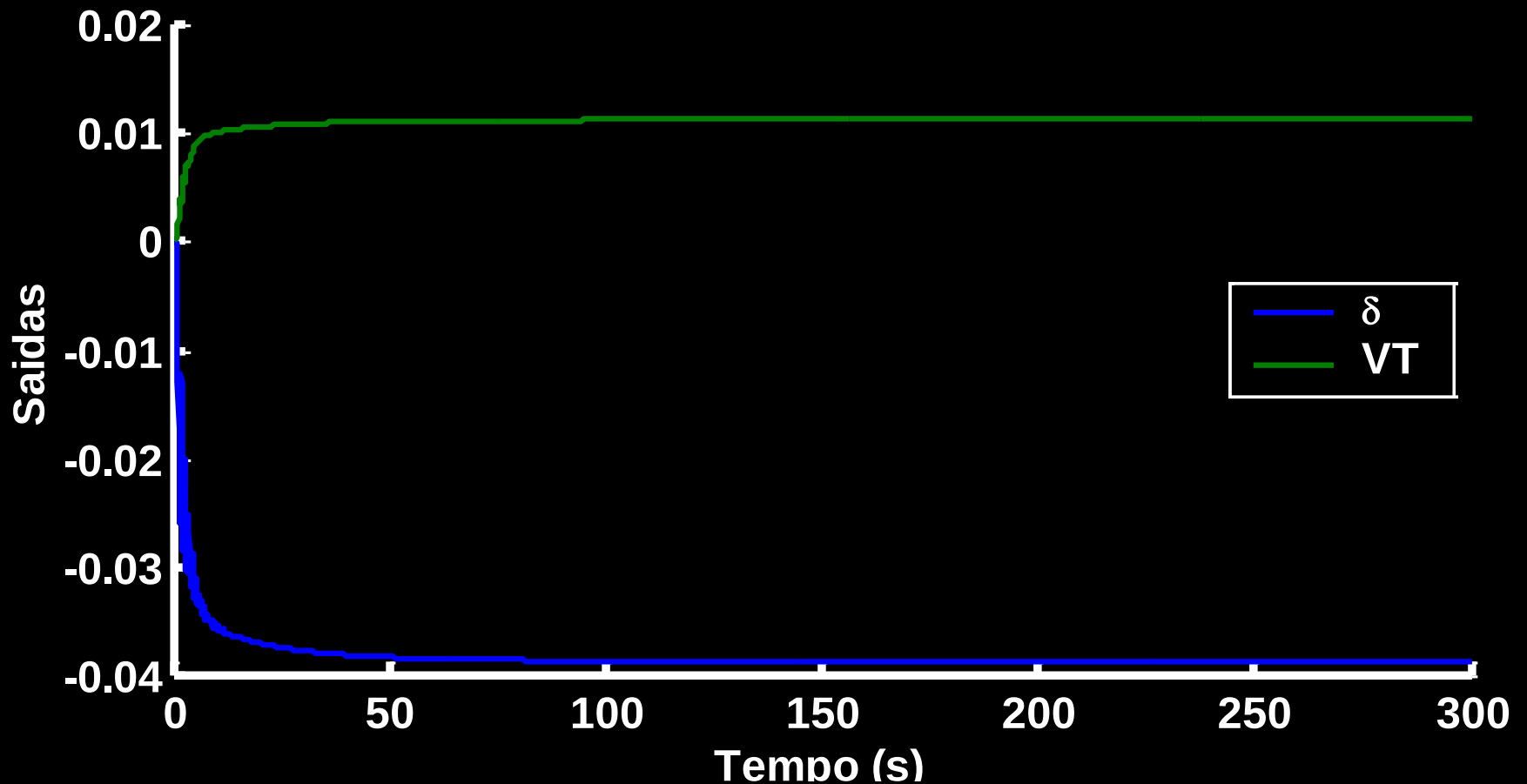
PROCESSO

Resposta do sistema ao degrau de 0.01 pu no laço de Tensão.



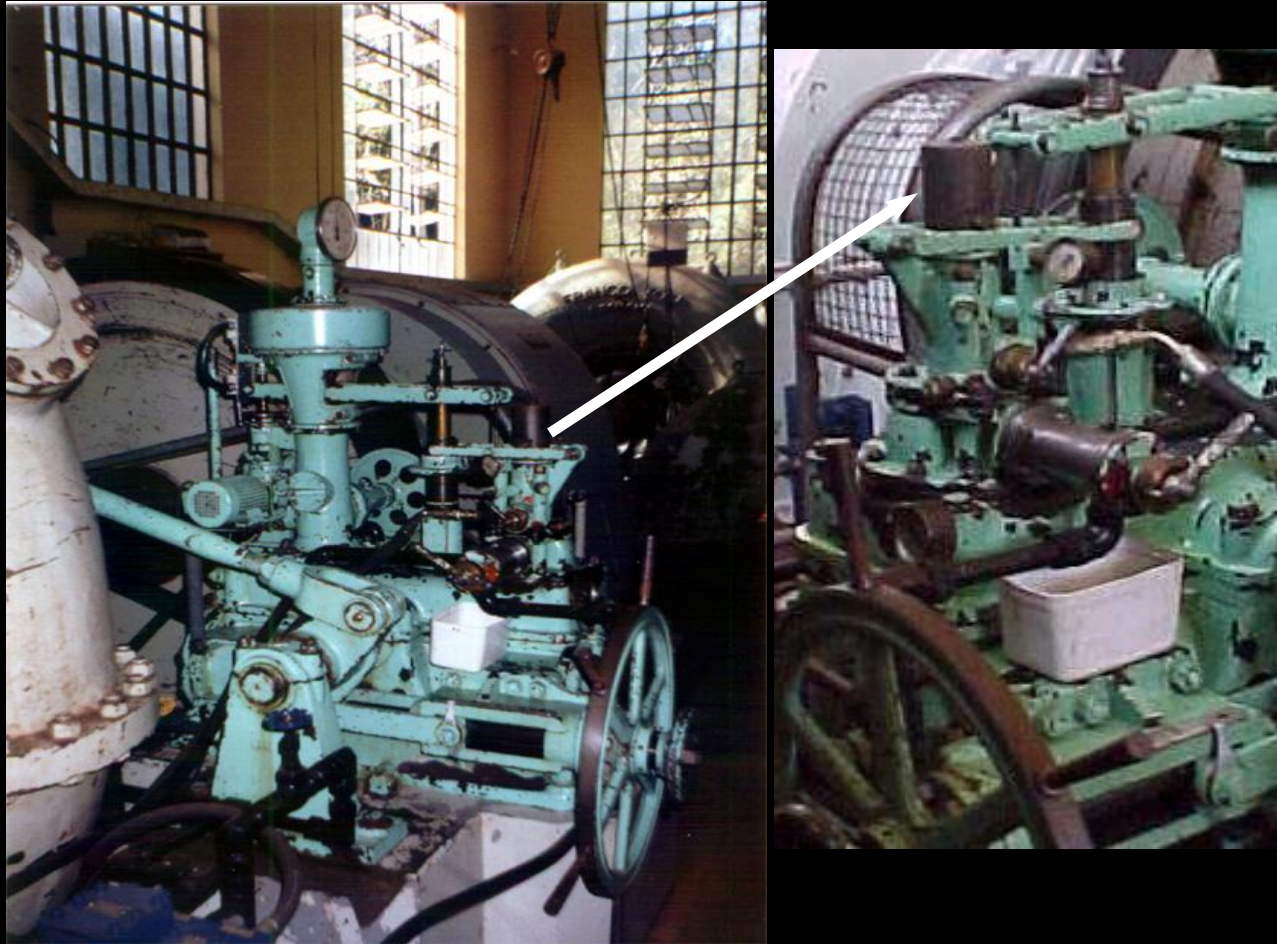
PROCESSO

Resposta do sistema com 0.01 pu de carga L.



PROCESSO

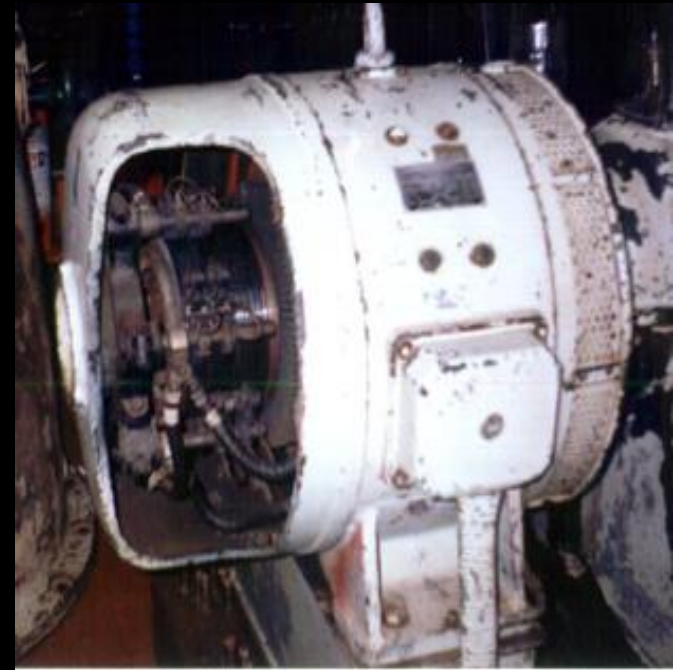
- Proposta de alteração.



- Parâmetro de estatismo permanente.

PROCESSO

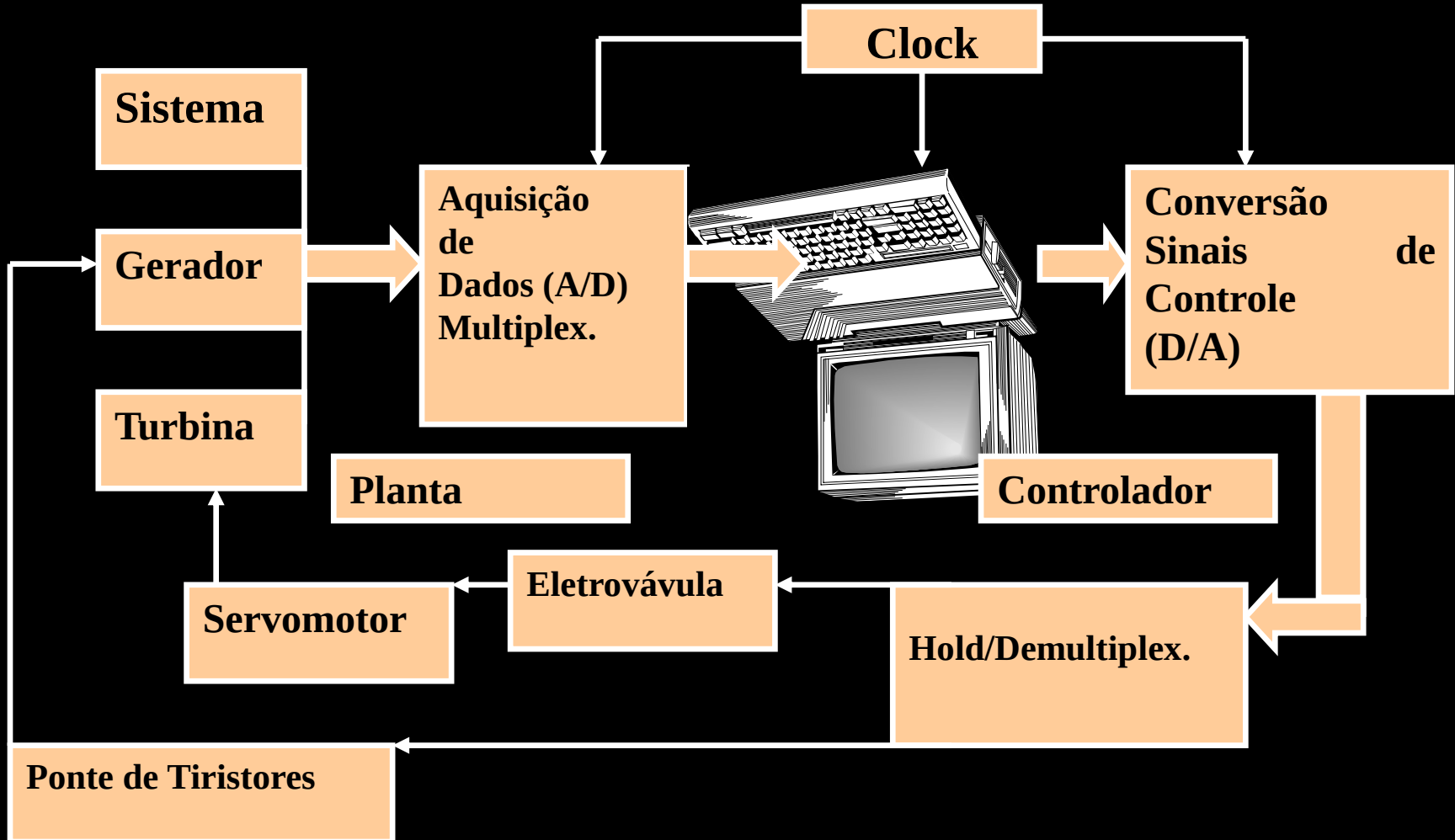
- Proposta de alteração.



- FT dos novos atuadores.

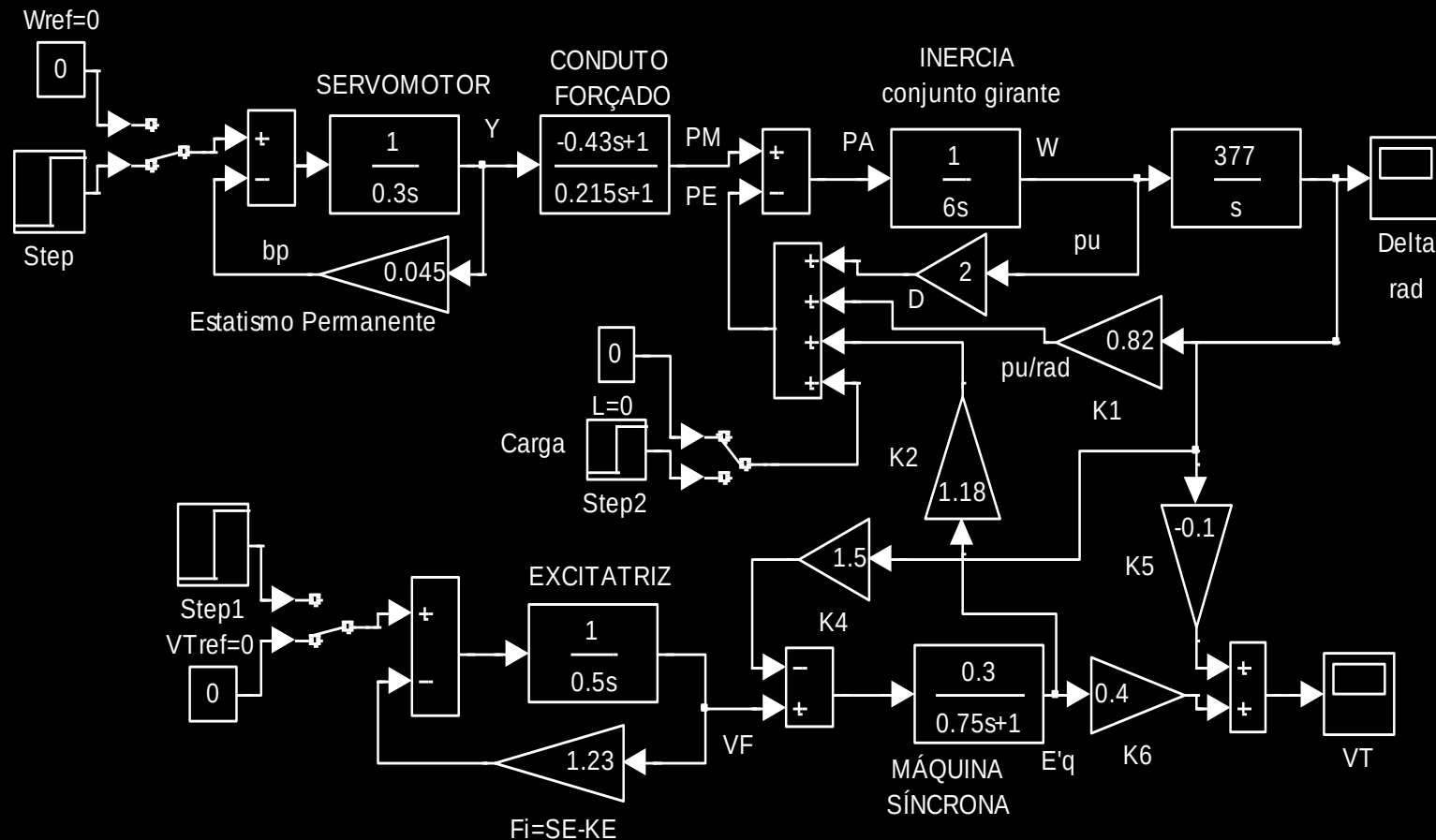
PROCESSO

Esquema de alterações propostas.



PROCESSO

Diagrama de Blocos com as alterações propostas.



PROCESSO

Modelo em Espaço de Estados para modelo proposto.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{bp}{T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{T_w} & -\frac{2}{T_w} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{H} & \frac{1}{2H} & -\frac{D}{2H} & -\frac{K_1}{2H} & 0 & -\frac{K_2}{2H} \\ 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\varphi}{T_E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_4}{T_{do}} & \frac{1}{T_{do}} & -\frac{1}{K_3 T_{do}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_5 & 0 & K_6 \end{bmatrix}$$

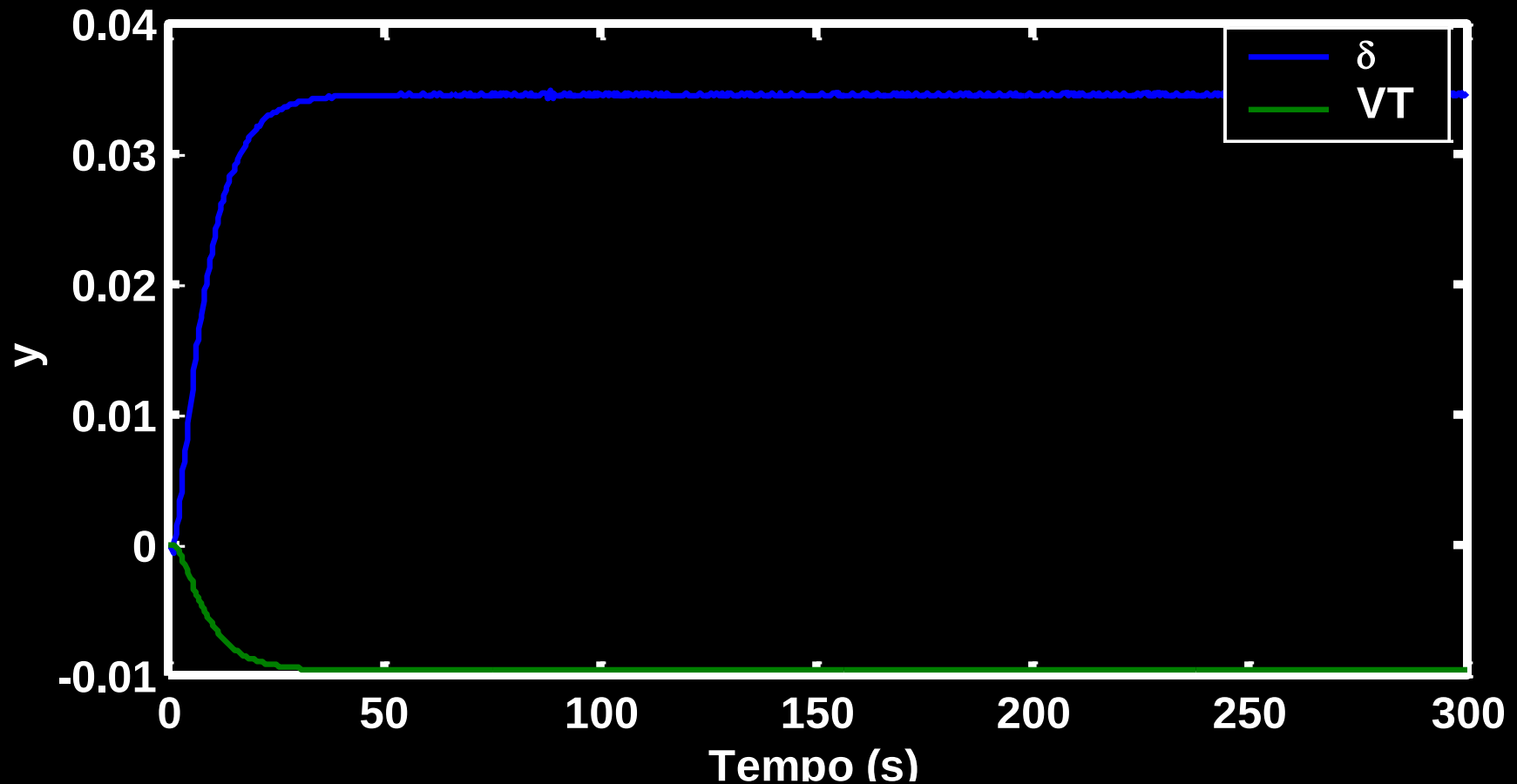
$$\mathbf{x}^T = [Y \quad x_2 \quad \omega \quad \delta \quad V_F \quad E'_q]$$

$$\mathbf{u}^T = [\omega_{REF} \quad V_{TREF} \quad L]$$

$$\mathbf{y}^T = [\delta \quad V_T]$$

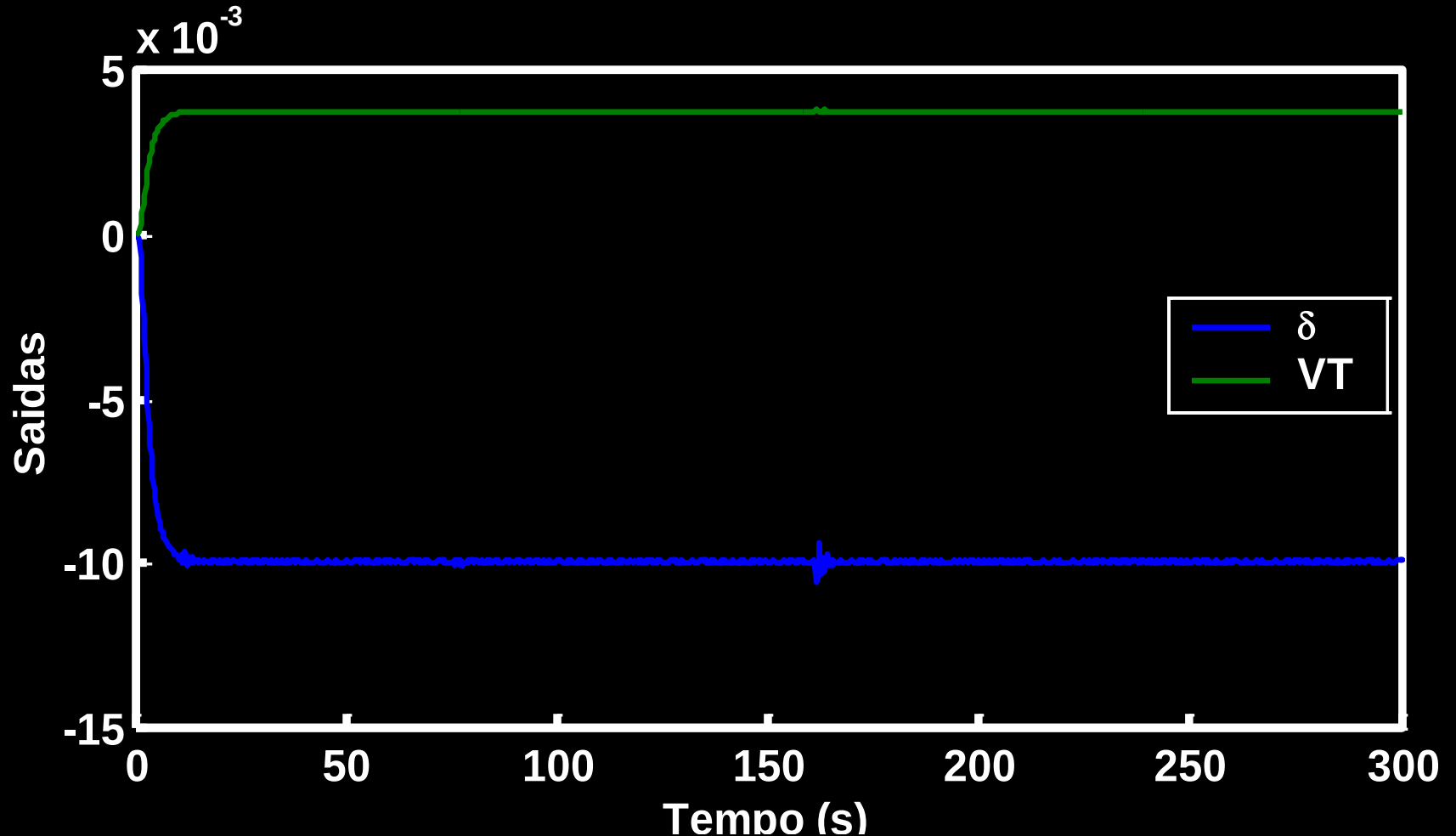
PROCESSO

Resposta do sistema ao degrau de 0.01 pu
no laço de velocidade.



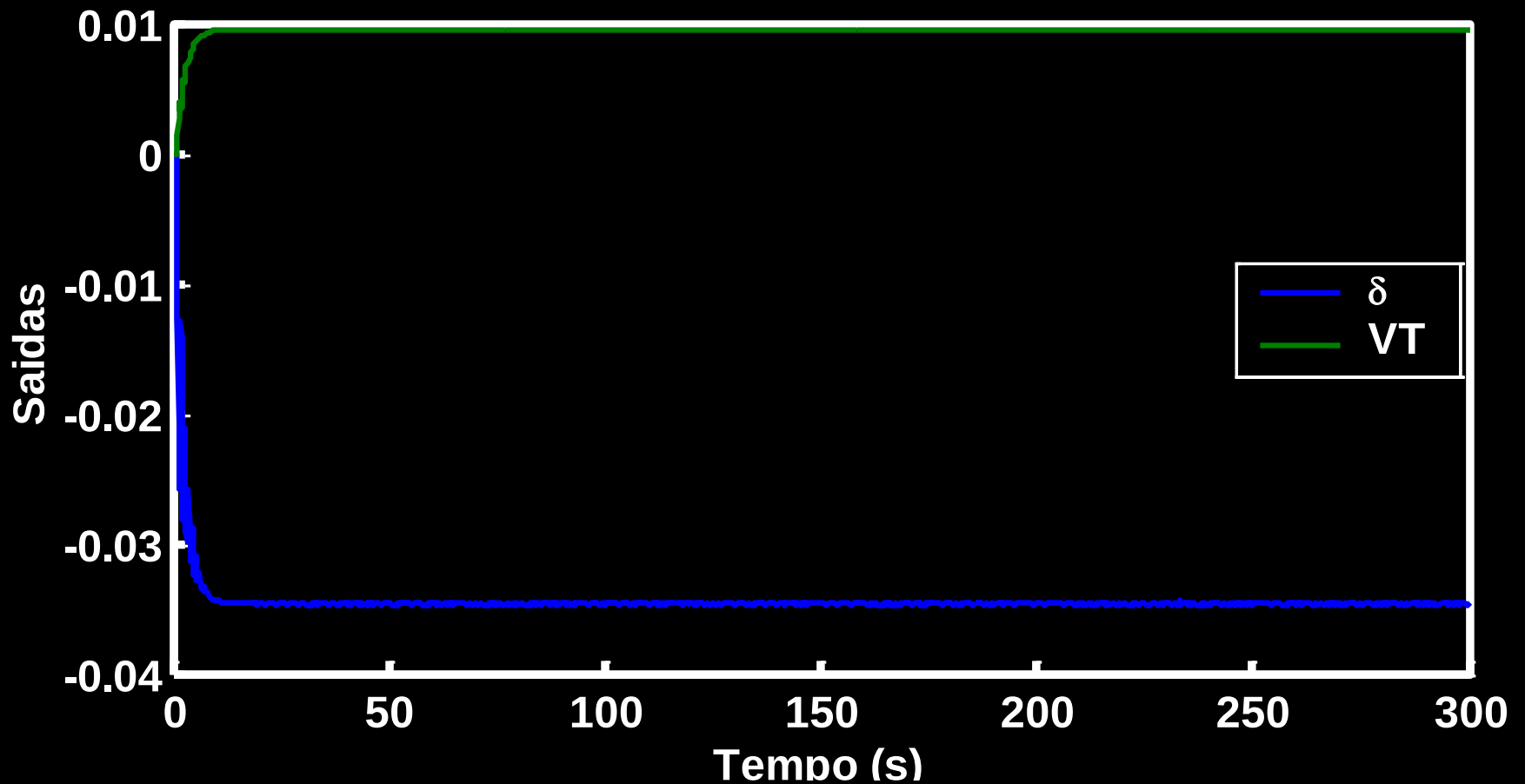
PROCESSO

Resposta do sistema ao degrau de 0.01 pu no laço de tensão.



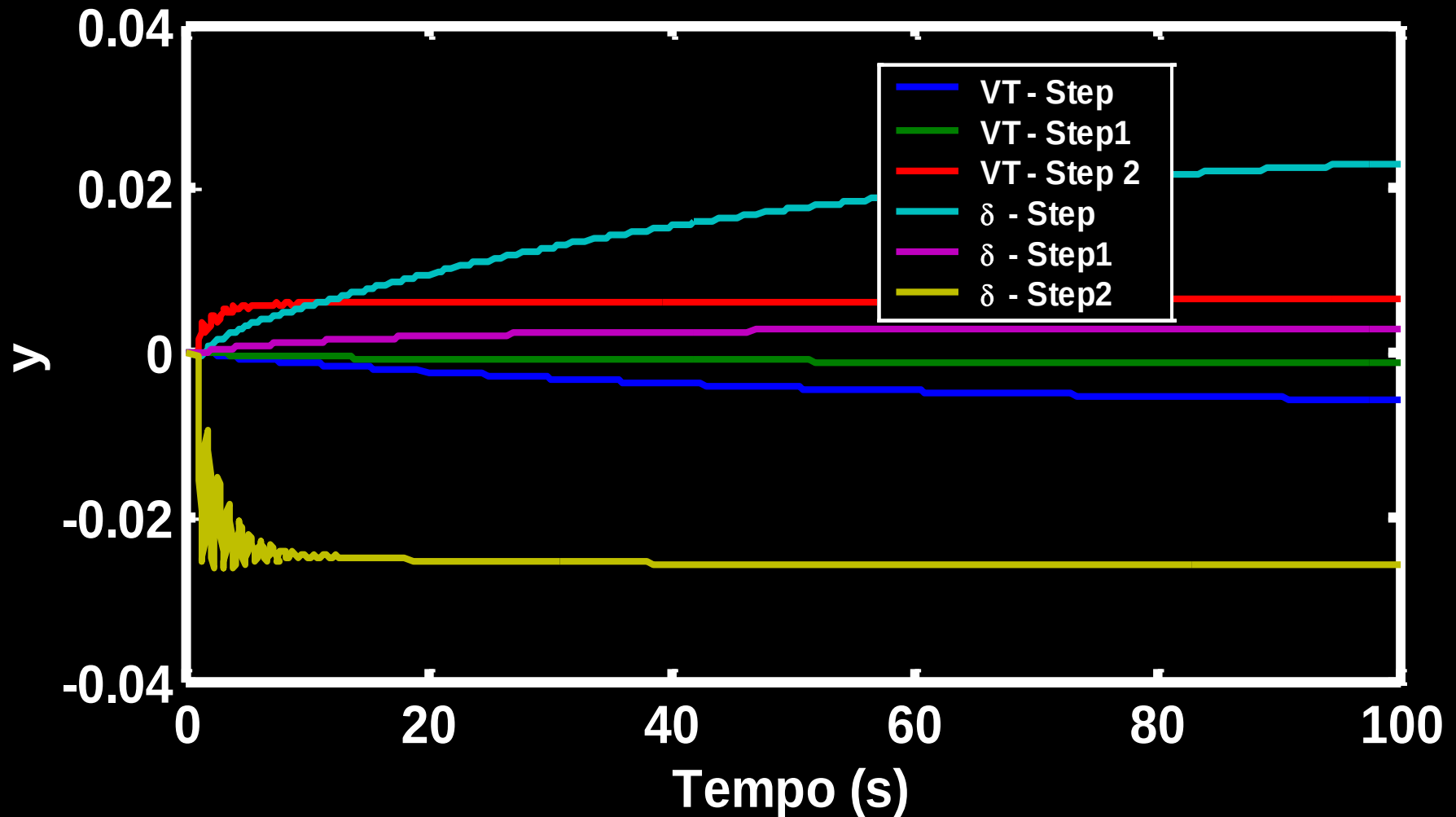
PROCESSO

Resposta do sistema a entrada de 0.01 pu de carga L.



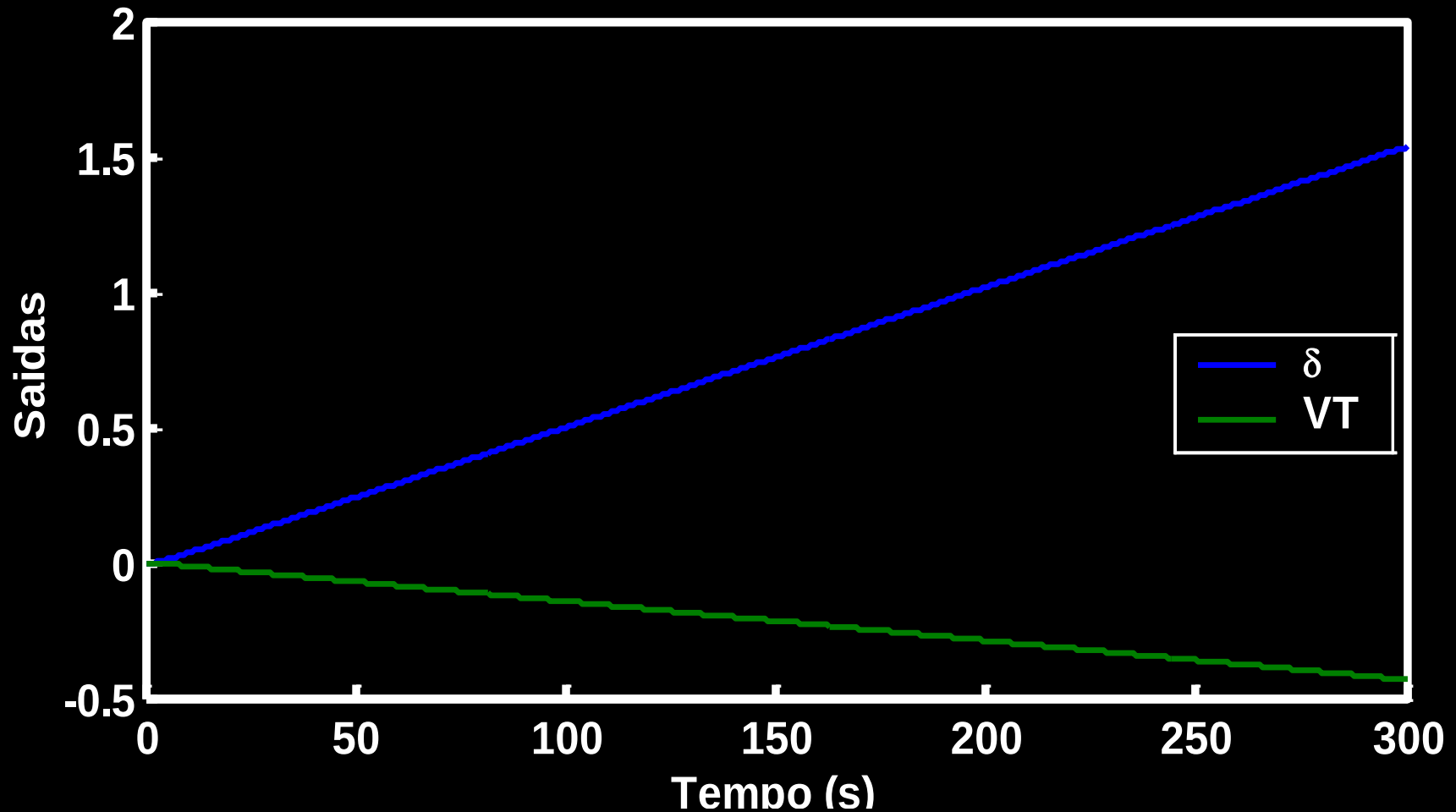
PROCESSO

Respostas do sistema



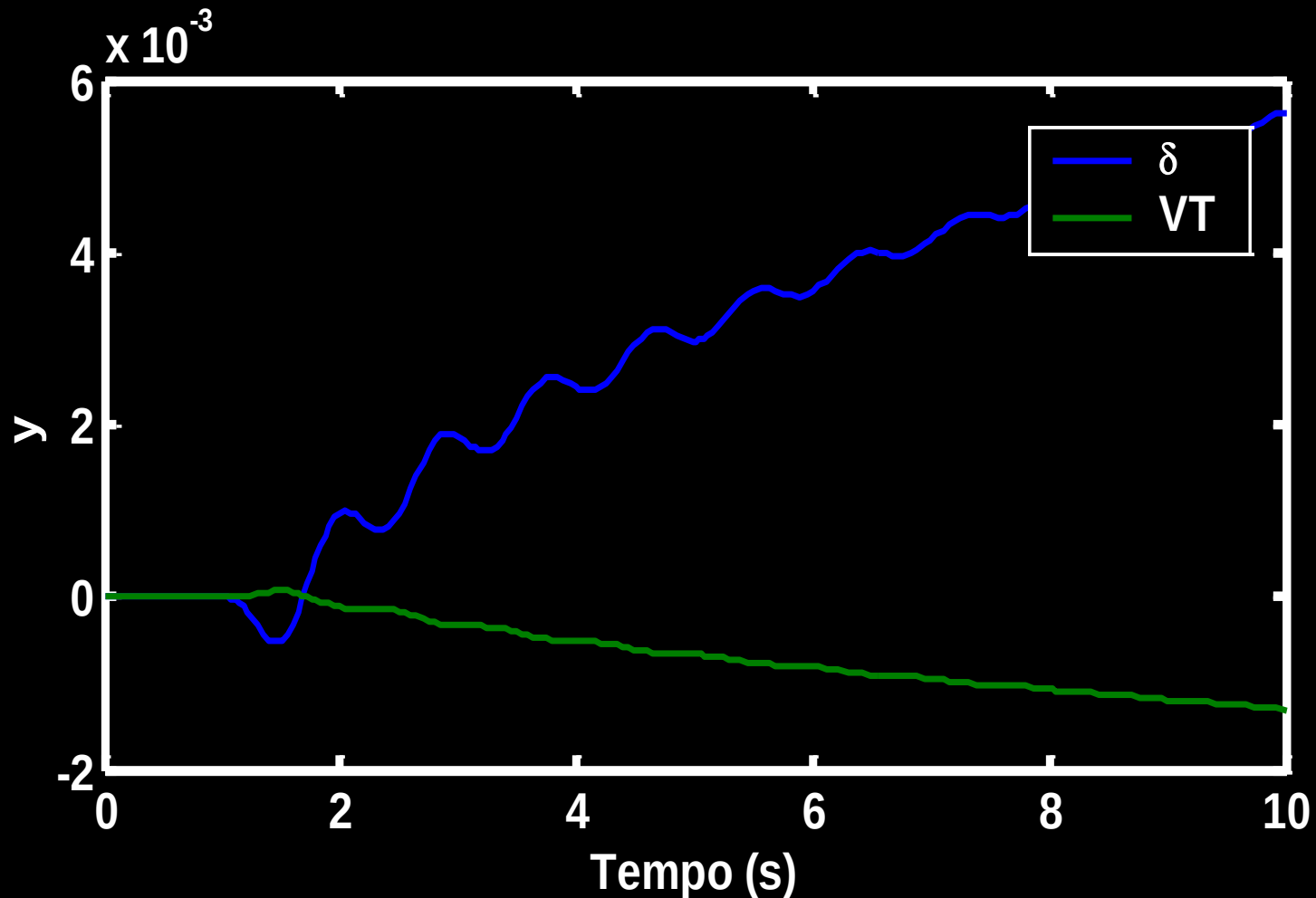
PROCESSO

Resposta do sistema a um degrau de 0.01 pu
no laço de velocidade sem bp.



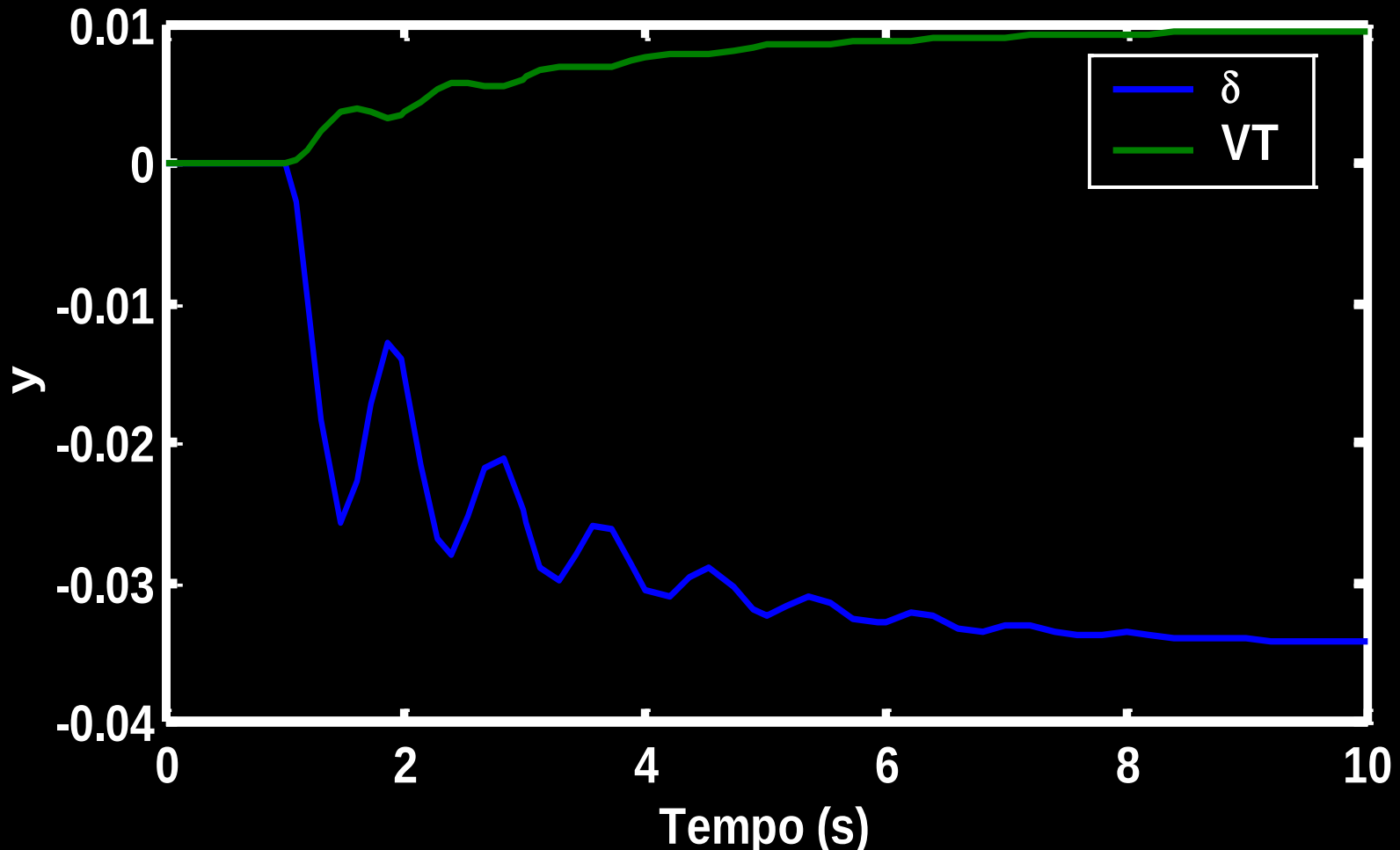
PROCESSO

Oscilação a que o sistema encontra-se sujeito: Original em L1



PROCESSO

Oscilação a que o sistema encontra-se sujeito: Novo Mod - Carga



PROCESSO

Controlabilidade de Estado: $\begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{AB} & \dots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}$

$$\text{CTRBEstado}^T = \begin{pmatrix} 3.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1666 & 0 & 0 & 0 \\ -0.5000 & 46.5116 & -1.1111 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4.9200 & 0.8000 \\ 0 & 0 & -0.0555 & 62.8333 & 0 & 0 \\ 0.0750 & -223.3098 & 8.2889 & -418.8888 & -3.0346 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1573 & 0 & 0 & -3.0346 \\ 0 & 0 & -8.568 & -20.9444 & 0 & -37.7000 \\ -0.0112 & 1039.6971 & 17.2418 & 3124.9435 & 0 & 251.3333 \\ 0 & 0 & 0.6492 & -59.3146 & -29.7738 & 8.8875 \\ 0 & 0 & 13.1329 & -3230.4012 & 0 & 62.8333 \\ 0.0016 & -4835.9578 & -308.9651 & 6500.1737 & 0 & -2210.0772 \\ 0 & 0 & 6.1420 & 244.7718 & 73.2437 & 11.8292 \\ 0 & 0 & 424.7532 & 4951.1316 & 0 & 1854.4630 \\ -0.0002 & 22492.8509 & -1156.7170 & -116479.8713 & 0 & -953.3345 \\ 0 & 0 & -37.8259 & 2315.5496 & -180.1795 & -133.3379 \\ 0 & 0 & -1182.9501 & 160131.9927 & 0 & -5443.2963 \end{pmatrix}$$

PROCESSO

Controlabilidade de Saída: $\mathbf{C}[\mathbf{B} \quad \mathbf{AB} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]$

$$\text{CTRBSaída}^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.1666 & 0 \\ -1.1111 & 0 \\ 0 & 0.3200 \\ -0.0555 & -6.2833 \\ 8.2889 & 41.8888 \\ -0.1573 & -1.2138 \\ -8.5687 & -12.9855 \\ 17.2418 & -211.9610 \\ 0.6492 & 9.4864 \\ 13.1329 & 348.1734 \\ 308.9651 & 1534.0482 \\ 6.1420 & -19.7454 \\ 424.7532 & 246.6720 \\ -1156.7137 & 11266.6532 \\ -37.8259 & -284.8901 \\ -1182.9501 & -18190.5178 \end{pmatrix}$$

PROCESSO

$$\text{Observabilidade}^T : \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T & \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T & \dots & (\mathbf{A}^T)^{n-1} \mathbf{C}^T \end{bmatrix}$$

$$\text{OBSV} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1000 & 0 & 0.4000 \\ -0.3333 & 0.1666 & -0.3333 & -0.1366 & 0 & -0.1966 \\ 0 & 0 & -37.7000 & -0.2400 & 0.1600 & -0.5333 \\ 2.4866 & -0.8307 & -51.4122 & 0.1635 & -0.0786 & 0.3277 \\ 12.5666 & -6.2833 & -77.9133 & 5.4723 & -0.6069 & 8.1254 \\ 5.1725 & -4.7047 & 78.7978 & 6.8296 & 0.3246 & 9.6740 \\ -63.5883 & 16.2392 & 2089.0407 & 5.7728 & 4.7432 & 4.4890 \\ -92.6895 & 35.0155 & 2548.5197 & -16.5734 & 3.0710 & -28.3956 \\ -460.2144 & 272.6420 & 1480.0321 & -288.1956 & -9.8727 & -416.8300 \\ -347.0111 & 261.8902 & 7097.7009 & -331.2603 & -18.9129 & -463.3480 \\ 3379.9959 & -1021.4305 & 1.09143.1069 & 47.8269 & -142.4450 & 264.7004 \end{pmatrix}$$

PROCESSO

Estabilidade: Inspeção dos autovalores de A.

Sistema Proposto:

$$\text{POLOS}(\mathbf{A}) = [-0.1500 \quad -0.4710 \quad -0.5978 + 7.144i \quad -0.5978 - 7.144i \quad -2.4600 \quad -4.6512]$$

Sistema sem bp

$$\text{Polos}(\mathbf{MA}) = [0 \quad -0.4710 \quad -0.5978 + 7.1447i \quad -0.5978 - 7.1447i \quad -2.4600 \quad -4.6512]$$

• Observadores de estado: Pleno e Mínimo ($\mathbf{x}_2$ e $\mathbf{E}'_q$).

$$\mathbf{x}_m^T = [\mathbf{Y} \quad \omega \quad \mathbf{V}_F \quad \delta \quad \mathbf{x}_2 \quad \mathbf{E}'_q]$$

• Limitações do processo.

PROCESSO

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau} & 0 & \left(\frac{Td}{bp.\tau^2} - \frac{1}{bp.\tau} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{Tw} & -\frac{2}{Tw} & -\frac{6Td}{\tau Tw bp} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{H} & \frac{1}{2H} & \frac{Td}{\tau bp H} - \frac{D}{(2H)} & -\frac{K_1}{2H} & 0 & 0 & -\frac{K_2}{2H} \\ 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_5 K_A K_{AI}}{T_I} - \frac{1}{T_I} & 0 & -\frac{K_6 K_A K_{AI}}{T_I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_5 K_A K_{AI}}{T_E} - \frac{1}{T_E} & -\frac{\varphi}{T_E} & -\frac{K_6 K_A K_{AP}}{T_E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_4}{T_{do}} & 0 & \frac{1}{T_{do}} & -\frac{1}{K_3 T_{do}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_5 & 0 & 0 & K_6 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}^T = [x_1 \quad PM \quad \omega \quad \delta \quad x_5 \quad V_F \quad E'_q]$$

$$\mathbf{u}^T = [\omega_{REF} \quad V_{TREF} \quad L]$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{Td}{\tau^2} \right) & \frac{6Td}{\tau Tw} & -\frac{Td}{\tau H} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_A K_{AI}}{T_I} & \frac{K_A K_{AP}}{T_E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}^T = [\delta \quad V_T]$$

$$\mathbf{MF} = [-0.0260 \quad -0.0556 \quad -0.3308 + 7.4149i \quad -0.3308 - 7.4149i \quad -0.4628 \quad -2.4746 \quad -4.3829]$$

$$\mathbf{MF} = [-0.0260 \quad -0.0556 \quad -0.3308 \quad -0.4628 \quad -2.4746 \quad -4.3829]$$

PROJETO DO CONTROLADOR

Projeto do Controlador

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

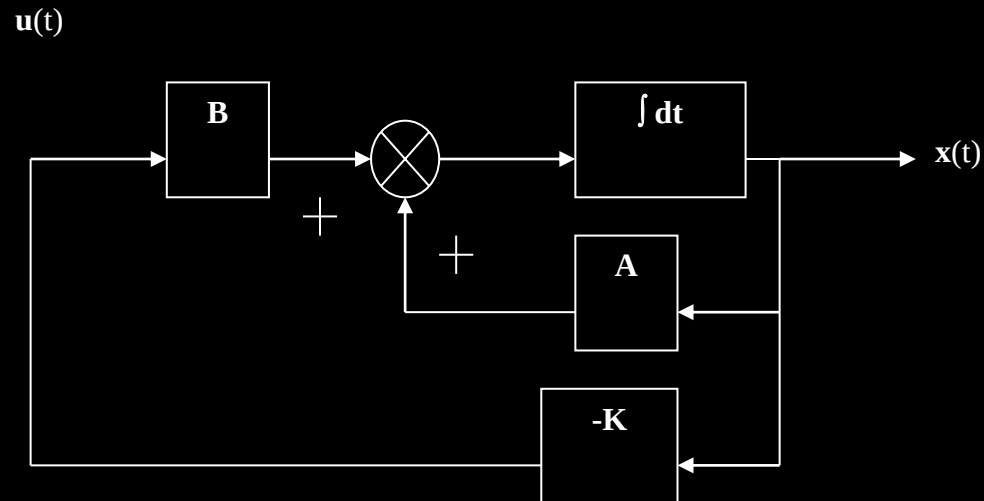
$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

Projeto do Controlador

Regulador

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$$

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x}$$



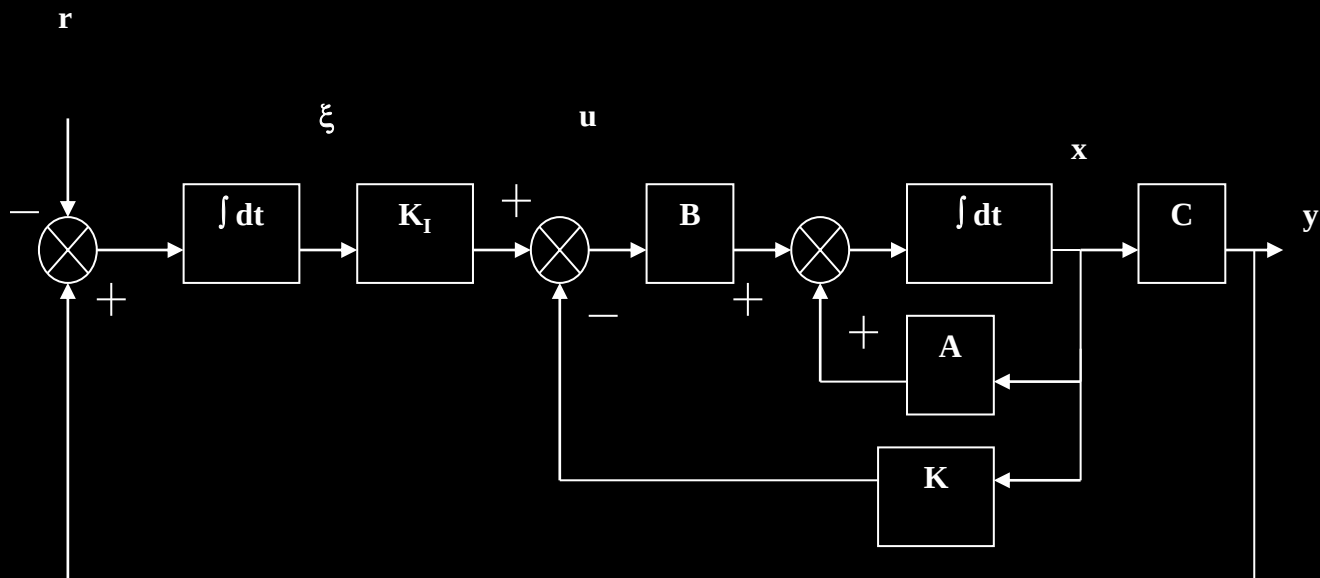
Projeto do Controlador

Servo

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{k}_i \xi$$

$$\xi = \mathbf{r} - \mathbf{y} = \mathbf{r} - \mathbf{C}\mathbf{x}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{Bk}_i \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{r}$$



Projeto do Controlador

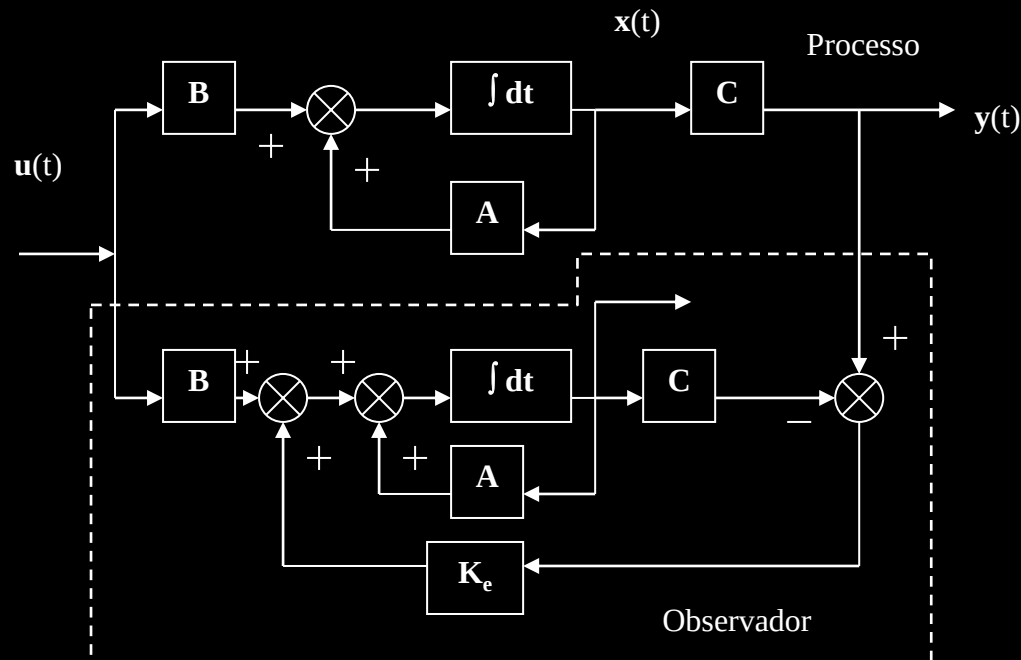
Regulador com Observador (Pleno)

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{BK} \\ \mathbf{K}_e \mathbf{C} & \mathbf{A} - \mathbf{BK} - \mathbf{K}_e \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix}$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}_e(\mathbf{y} - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}})$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix}$$



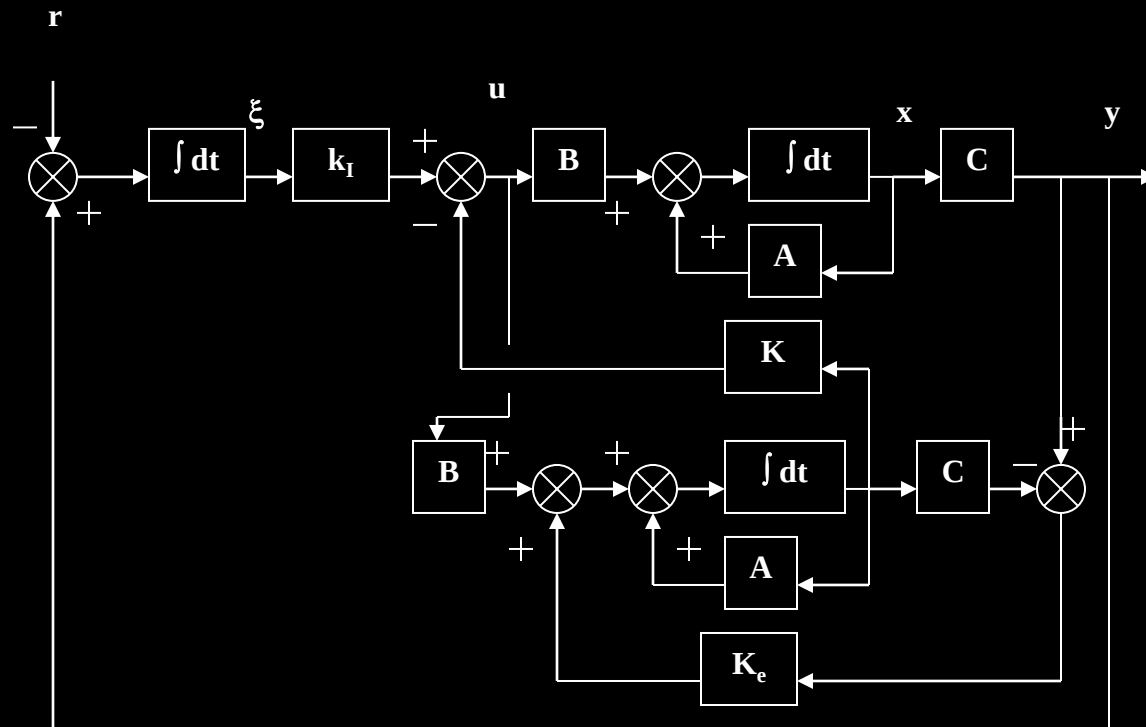
Projeto do Controlador

Servo com Observador (Pleno)

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{k}_i\xi$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\xi} \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}\mathbf{k}_i & -\mathbf{B}\mathbf{K} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_e\mathbf{C} & \mathbf{B}\mathbf{k}_i & \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K} - \mathbf{K}_e\mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \xi \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{r}$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}] \mathbf{e}_{\text{so}}$$



Projeto do Controlador

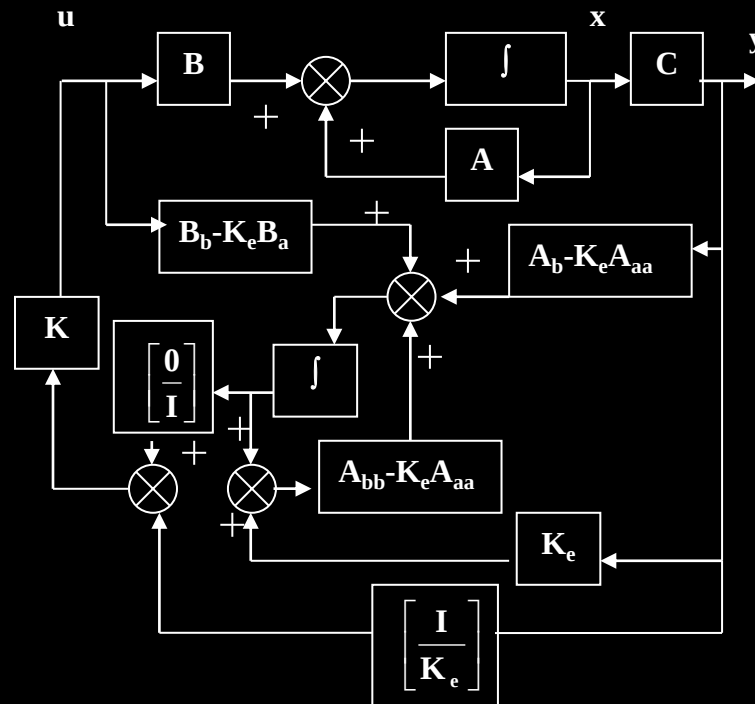
Regulador com Observador (Mínimo)

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a \\ \tilde{\mathbf{x}}_b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{BK}\boldsymbol{\Omega} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e\mathbf{A}_{ab} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}[\mathbf{x} + \boldsymbol{\Omega}(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}})]$$

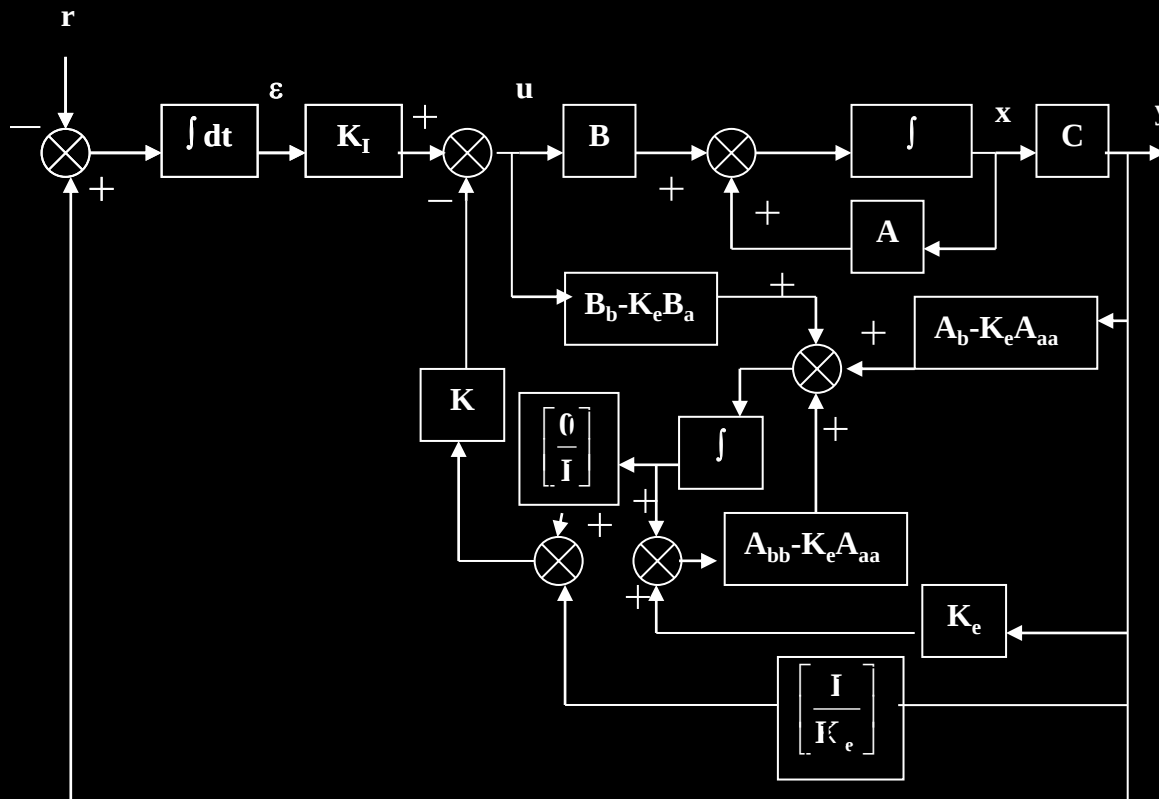


Projeto do Controlador

Servo com Observador (Mínimo)

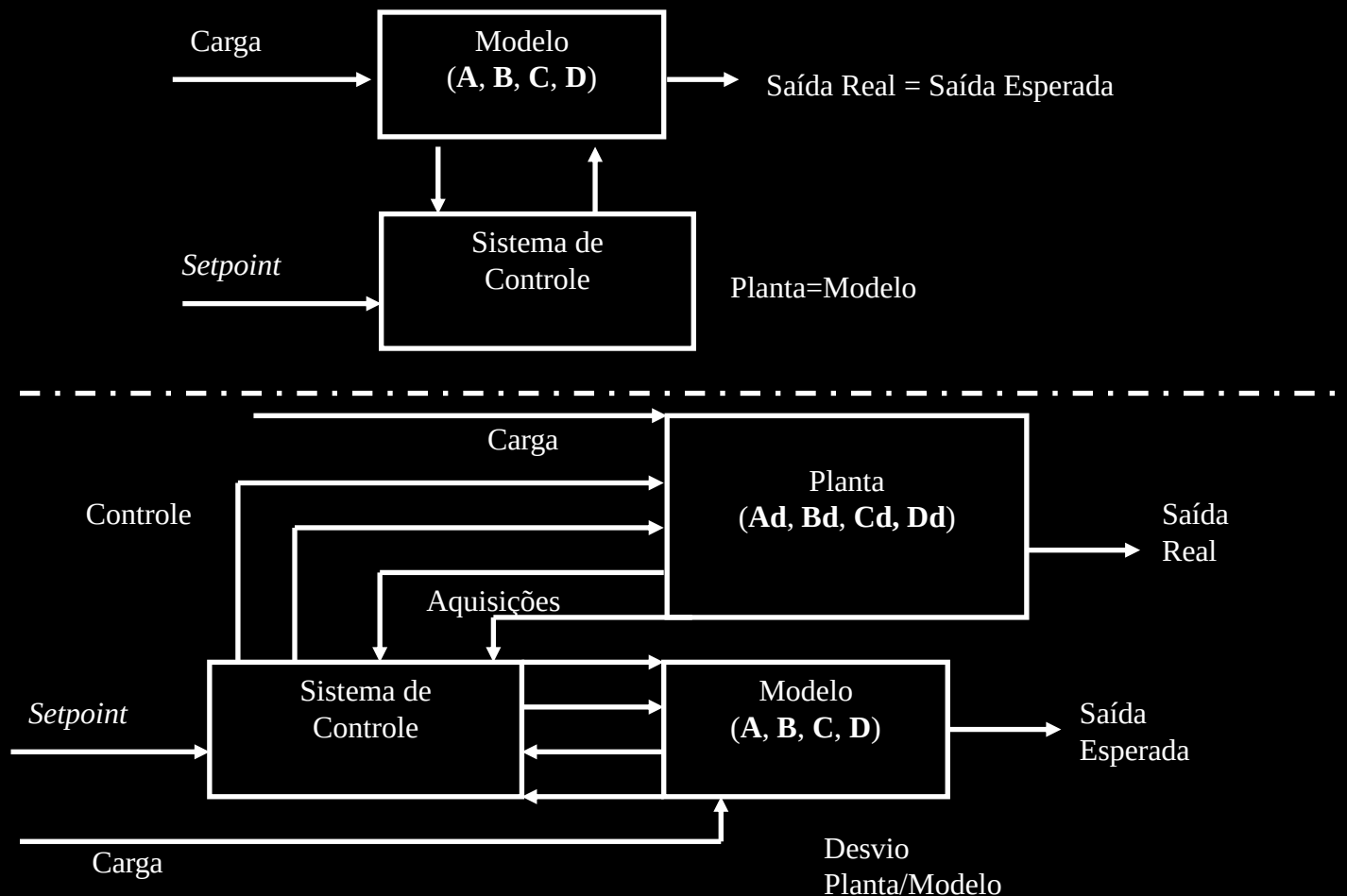
$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\xi} \\ \ddot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{B}k_i & \mathbf{BK}\Omega \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e\mathbf{A}_{ab} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} r$$

$$y = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}] \mathbf{e}_{\text{SOM}}$$



Projeto do Controlador

Modelagem perfeita x Desvio planta/modelo



Projeto do Controlador

Controle por Colocação de Pólos

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = |s\mathbf{I} - \mathbf{A}_N| = (s - \chi_1)(s - \chi_2) \dots (s - \chi_n) = s^n + \varsigma_1 s^{n-1} + \dots + \varsigma_{n-1} s + \varsigma_n = 0$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{AB} & \dots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}^{-1} \boldsymbol{\Theta}(\mathbf{A})$$

$$\mathbf{K}_e = \boldsymbol{\Theta}(\mathbf{A}) \left(\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{CA} & \dots & \mathbf{C}(\mathbf{A})^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \right)^T \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

Projeto do Controlador

Controle Ótimo: Quadrático

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt \quad \mathbf{Q}, \mathbf{R} \text{ e restrições.}$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} + \boldsymbol{\lambda}^T [\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}]$$

$$\mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \mathbf{0}$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{P} \mathbf{x}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{u}^T} = \mathbf{R} \mathbf{u} + \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}$$

Projeto do Controlador

MPC

Discretização

$$\mathbf{x}[(k+1)T_T] = e^{AT_T} \mathbf{x}(kT_T) + \left\{ \int_{kT_T}^{(k+1)T_T} e^{A[(k+1)T_T - \nu]} \mathbf{B} d\nu \right\} \mathbf{u}(kT_T)$$

$$\mathbf{x}[(k+1)T_T] = \mathbf{\Phi}(T_T) \mathbf{x}(kT_T) + \mathbf{\Gamma}(T_T) \mathbf{u}(kT_T)$$

$$\mathbf{\Phi} = e^{AT_T}$$

$$\mathbf{\Gamma} = \left\{ \int_0^{T_T} e^{A\iota} d\iota \right\} \mathbf{B}$$

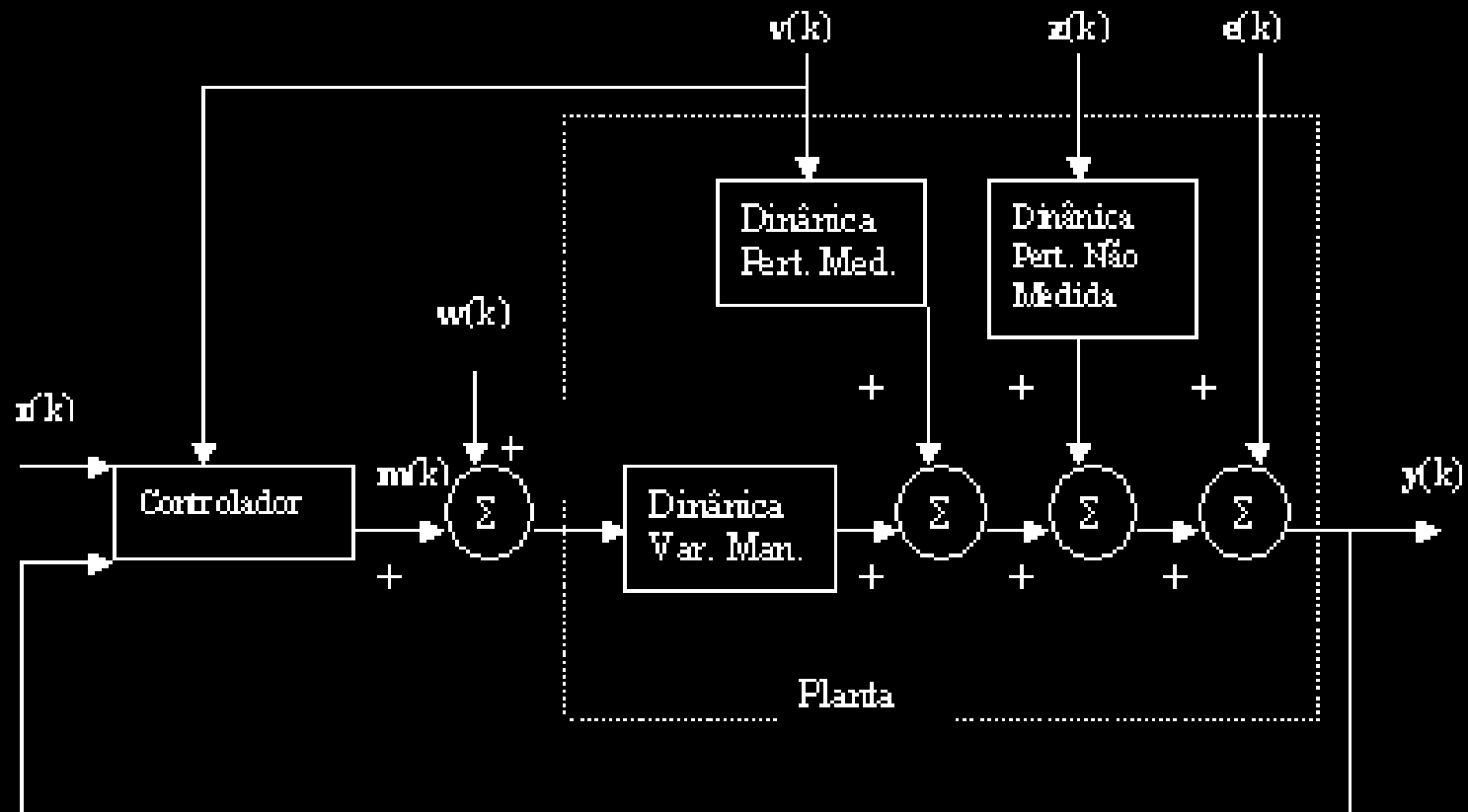
Projeto do Controlador

MPC

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}\mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{u}^T(k) = [\mathbf{m}^T(k) \ \mathbf{v}^T(k) \ \mathbf{w}^T(k) \ \mathbf{z}^T(k) \ \mathbf{e}^T(k)]^T$$



Projeto do Controlador

MPC com Restrição: Considerações

- Modelo Interno: predição, ajuste e estimativa.
- Escolha de u : saídas e critério.
- Estimativa de x baseada em y .
- Perturbações Futuras não medidas e estados futuros.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \tilde{\Phi}\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \tilde{\Gamma}_m \mathbf{m}(k) + \tilde{\Gamma}_v \mathbf{v}(k) + \mathbf{K}_{\text{MPC}} \hat{\mathbf{d}}(k|k)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k-1) = \tilde{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{D}}_v \mathbf{v}(k)$$

$$\hat{\mathbf{d}}(k|k) = \mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k|k-1)$$

Projeto do Controlador

MPC com Restrição: Considerações

- Modelo de Referência.

$$\mathbf{x}_r(k+1) = \mathbf{\Phi}_r \mathbf{x}_r(k) + \mathbf{\Gamma}_r \mathbf{u}_r(k)$$

$$\mathbf{y}_r(k) = \mathbf{C}_r \mathbf{x}_r(k) + \mathbf{D}_r \mathbf{u}_r(k)$$

$$\mathbf{u}_r(k) = \mathbf{r}(k) - \hat{\mathbf{d}}(k | k) \quad \mathbf{y}_r = \mathbf{r} - \tilde{\mathbf{y}} + \mathbf{y}_r$$

- Definir k .
- Medir $\mathbf{y}$ e $\mathbf{v}$.
- Calcular $\mathbf{x}$ futuro
- Estimar $\mathbf{d}$ futuro.
- Encontrar $\mathbf{m}$ ótimo.

Projeto do Controlador

MPC

Projeto do Controlador

$$J = \min_{\boldsymbol{\mu}(k)} \left\{ [\boldsymbol{\Psi}_r(k) - \boldsymbol{\Psi}(k)]^T \mathbf{Q} [\boldsymbol{\Psi}_r(k) - \boldsymbol{\Psi}(k)] + \Delta \boldsymbol{\mu}^T(k) \mathbf{R} \Delta \boldsymbol{\mu} \right\}$$

$$\boldsymbol{\mu}(k) \geq \boldsymbol{\mu}_{\min}(k) \quad \boldsymbol{\mu}(k) \leq \boldsymbol{\mu}_{\max}(k) \quad |\Delta \boldsymbol{\mu}(k)| \leq \Delta \boldsymbol{\mu}_{\max}(k) \quad \boldsymbol{\Psi}(k) \geq \boldsymbol{\Psi}_{\min}(k) \quad \boldsymbol{\Psi}(k) \leq \boldsymbol{\Psi}_{\max}(k)$$

$$\Delta \boldsymbol{\mu}(k) = \mathbf{R}_{\Delta} \boldsymbol{\mu}(k) - \boldsymbol{\delta}(k)$$

$$\mathbf{R}_{\Delta} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Lambda & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{I} & & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M} & & & \Lambda & & \mathbf{M} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Lambda & -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\delta}(k) = [\mathbf{m}^T(k-1) \quad 0 \quad 0 \quad \Lambda \quad 0]^T$$

Projeto do Controlador

$$J = \max_{\mathbf{v}(k)} \left\{ \mathbf{a}^T(k) \mathbf{v}(k) - \frac{1}{2} \mathbf{v}(k)^T \mathbf{B}_{\text{MPC}} \mathbf{v}(k) \right\}$$

$$\mathbf{A}_{\text{MPC}} \mathbf{v}(k) \leq \mathbf{b}(k)$$

Problema com Restrição

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{B}_{\text{MPC}} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & -\mathbf{A}_{\text{MPC}}^T \\ \mathbf{A}_{\text{MPC}} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}(k) \\ \zeta(k) \\ \lambda_v(k) \\ \lambda_\zeta(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{a}(k) \\ \mathbf{b}(k) \end{bmatrix}$$
$$\zeta(k) = \mathbf{b}(k) - \mathbf{A}_{\text{MPC}} \mathbf{v}(k)$$

Problema sem Restrição

$$\mathbf{m}(k) = \mathbf{K}_x \hat{\mathbf{x}}(k | k-1) + \mathbf{K}_{x_r} \mathbf{x}_r(k) + \mathbf{K}_u \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{K}_r \mathbf{r}(k) - \mathbf{K}_y \mathbf{y}(k) + \mathbf{K}_v(k)$$

RESULTADOS

Resultados

Colocação de Pólos

- $\mathbf{r} = [-2.4746 \ -11 \ -0.026 \ -0.4628 \ -4.3829 \ -0.3308] ;$
- $\mathbf{rs} = [-2.4746 \ -11 \ -0.026 \ -0.4628 \ -4.3829 \ -0.3308 \ -100 \ -100] ;$
- $\mathbf{rop} = \mathbf{r} * 100 ;$
- $\mathbf{rom} = [-11 \ -0.3328] * 100 ; \mathbf{r} = [-2.4746 \ -0.026 \ -4.3829 \ -0.4628 \ -11 \ -0.3328]$
 $\mathbf{rs} = [-2.4746 \ -0.026 \ -4.3829 \ -0.4628 \ -11 \ -0.3328 \ -100 \ -100]$

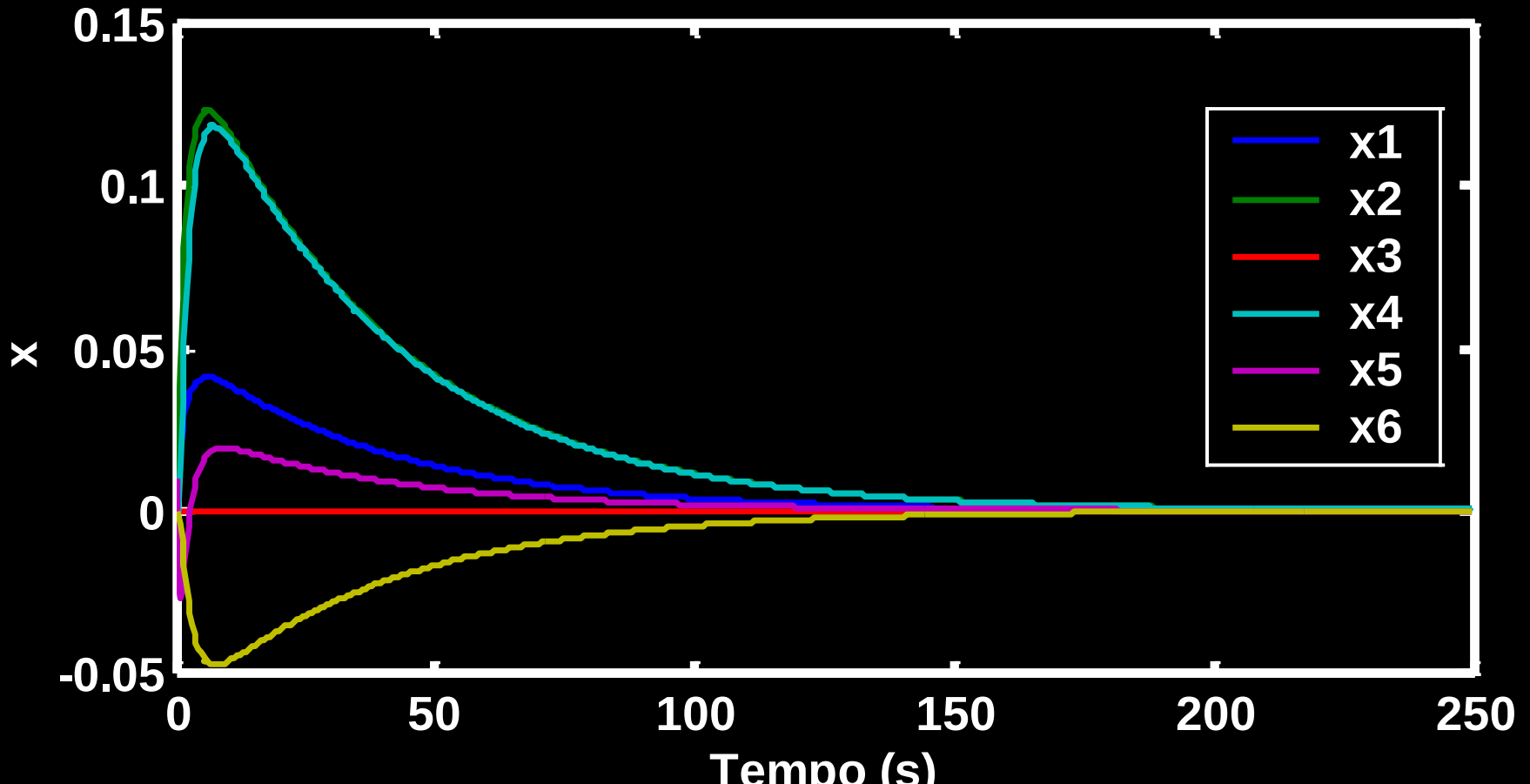
Controle Ótimo

- $\mathbf{R} = \mathbf{I}_2$ e $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_6 ;$
- $\mathbf{Rs} = \mathbf{I}_2$ e $\mathbf{Qs} = \mathbf{I}_8 ;$
- $\mathbf{R} = \mathbf{I}_2$ e $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_6$ e $\mathbf{Rs} = \mathbf{I}_2$ e $\mathbf{Qs} = \mathbf{I}_8$ e $\mathbf{Qop} = \mathbf{I}_6 * 100$
- $\mathbf{R} = \mathbf{I}_2$ e $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_6$ e $\mathbf{Rs} = \mathbf{I}_2$ e $\mathbf{Qs} = \mathbf{I}_8$ e $\mathbf{Qom} = \mathbf{I}_2 * 100$

Resultados

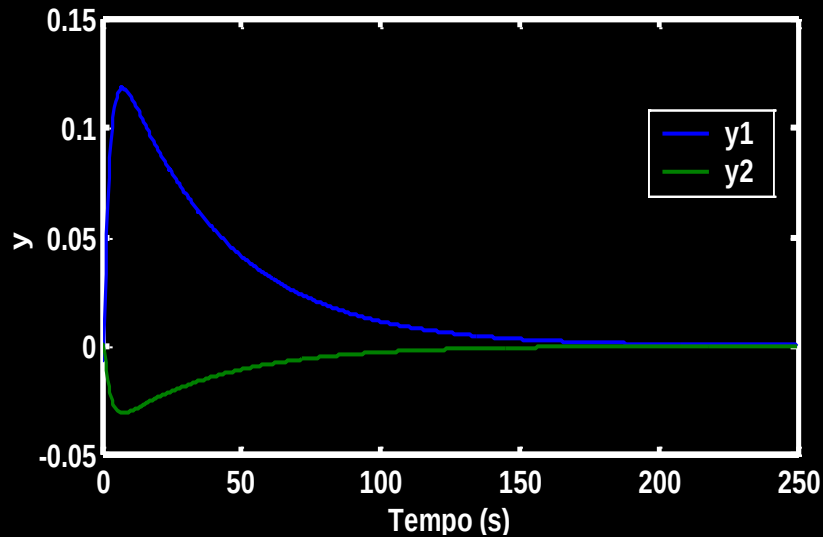
- Degraus e Perturbações.

Trajetória dos estados – Reg S/Obs e $P=M$

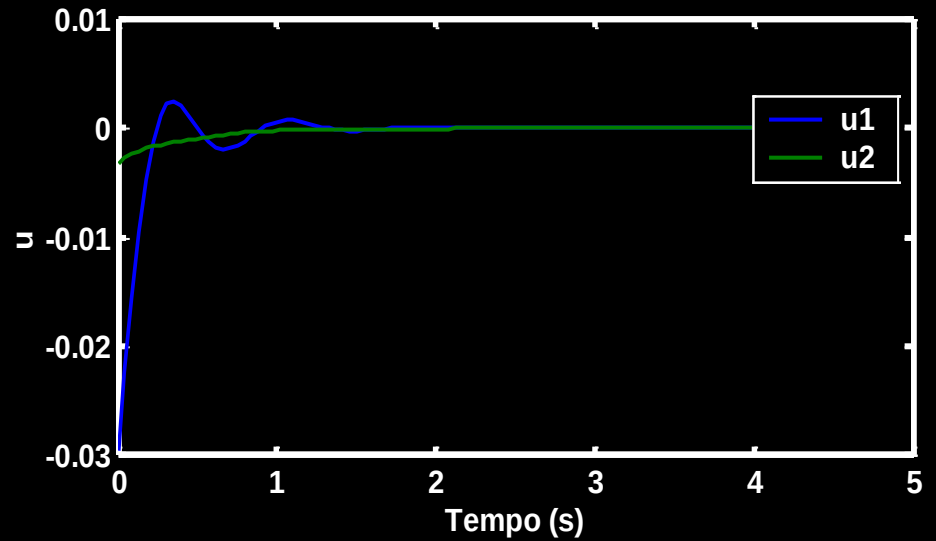
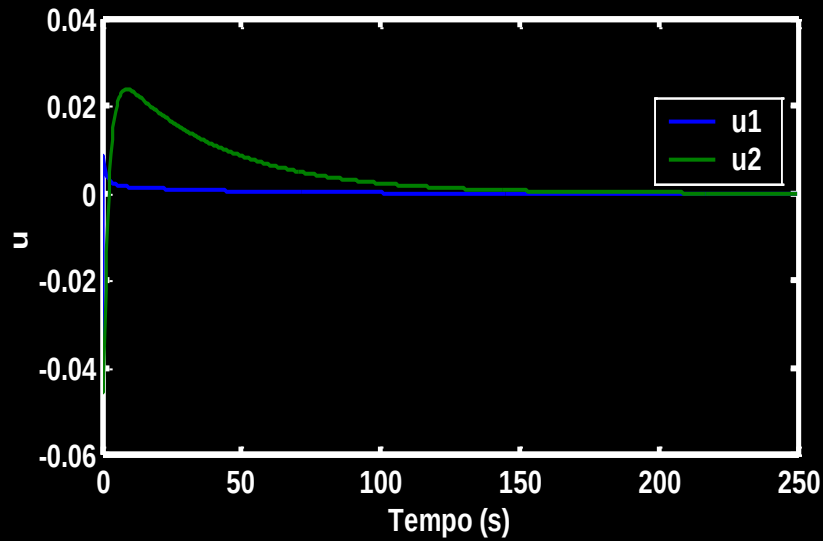
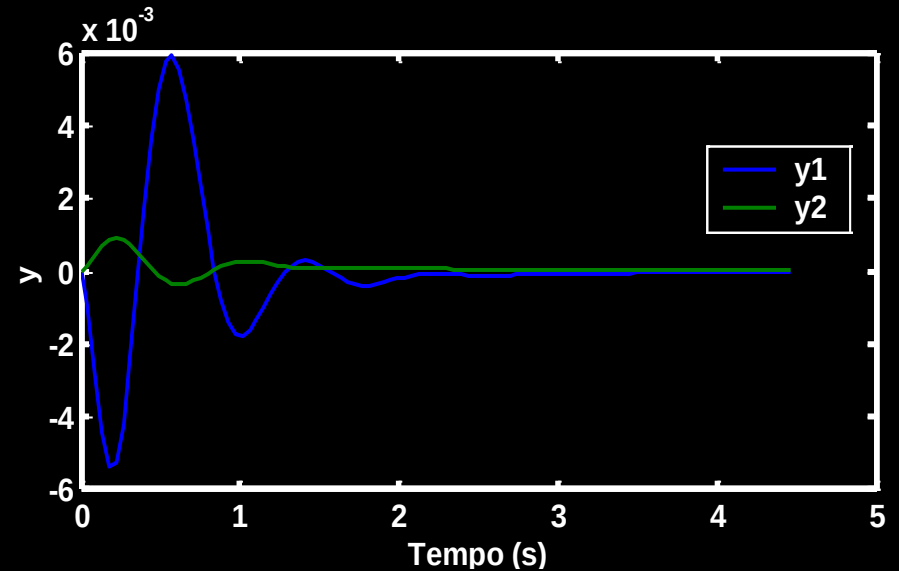


Resultados

Reg, P=M, S/Obs - CP

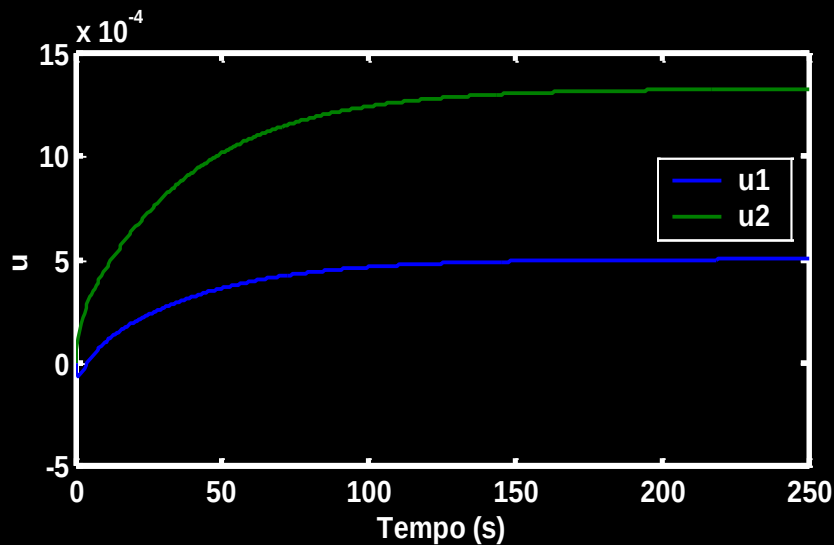
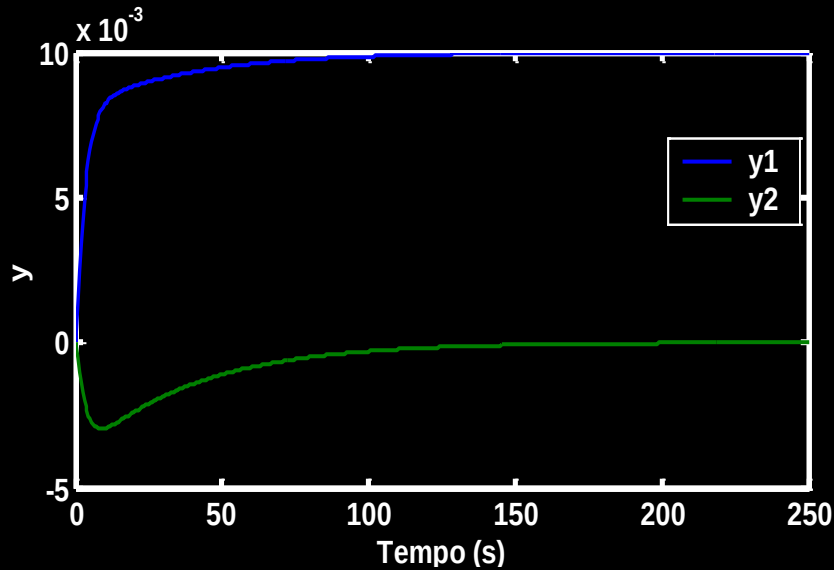


Reg, P=M, S/Obs - CO

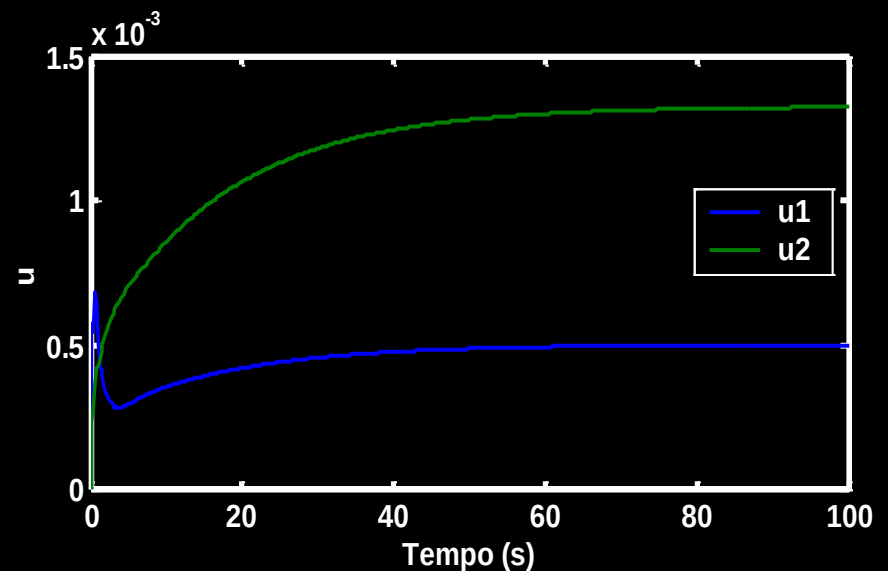
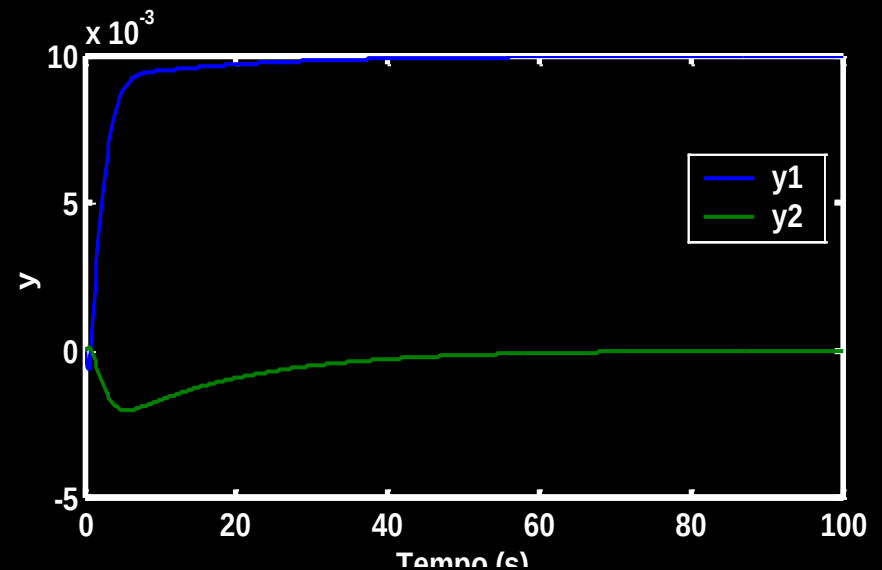


Resultados

Ser, P=M, C/Obs P - CP

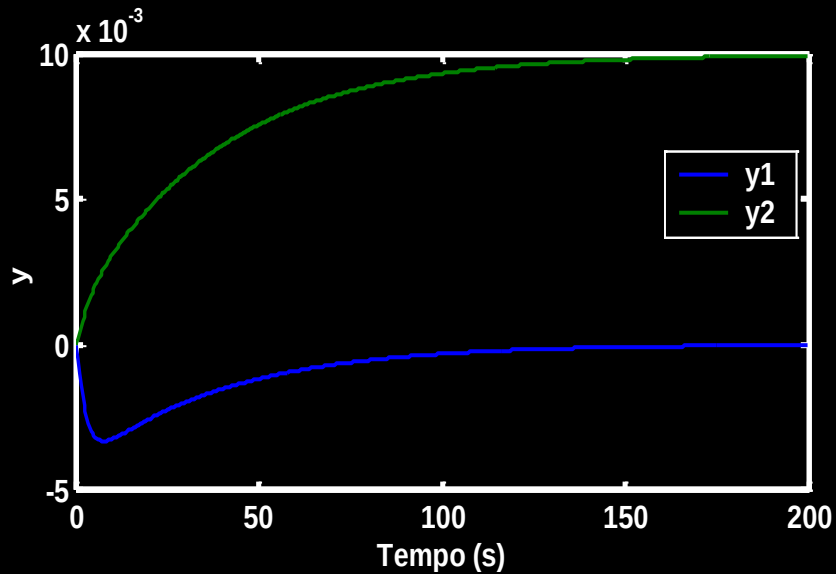


Ser, P=M, C/Obs P - CP

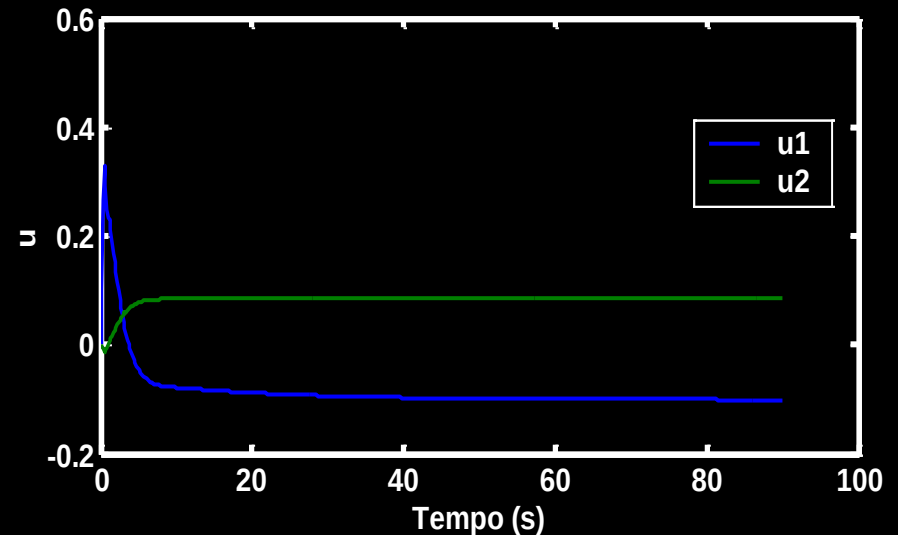
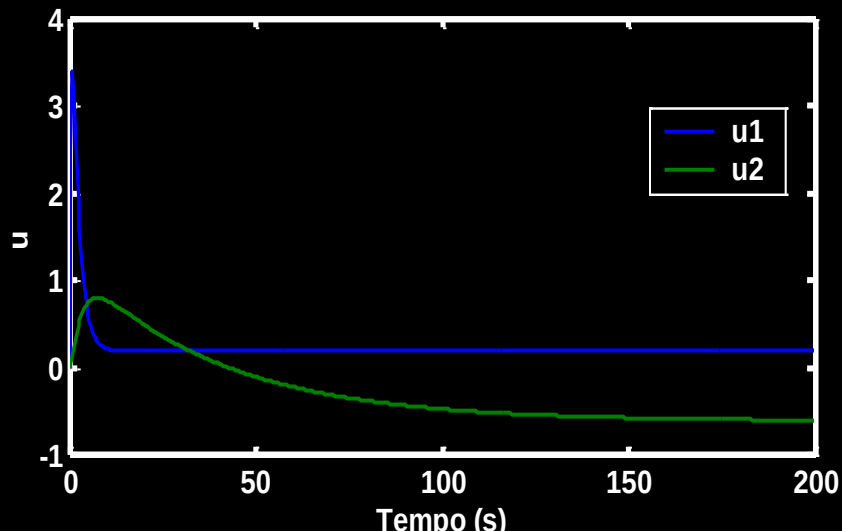
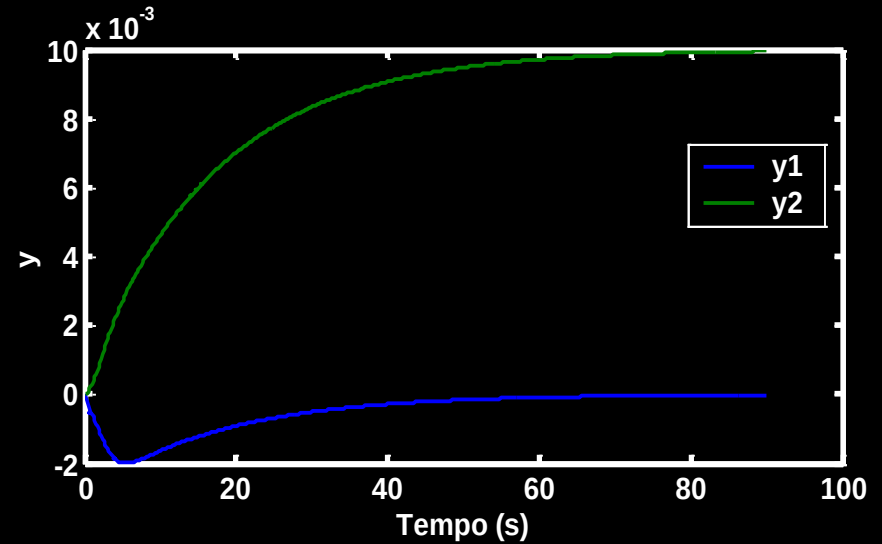


Resultados

Ser, P=M, C/Obs M - CP

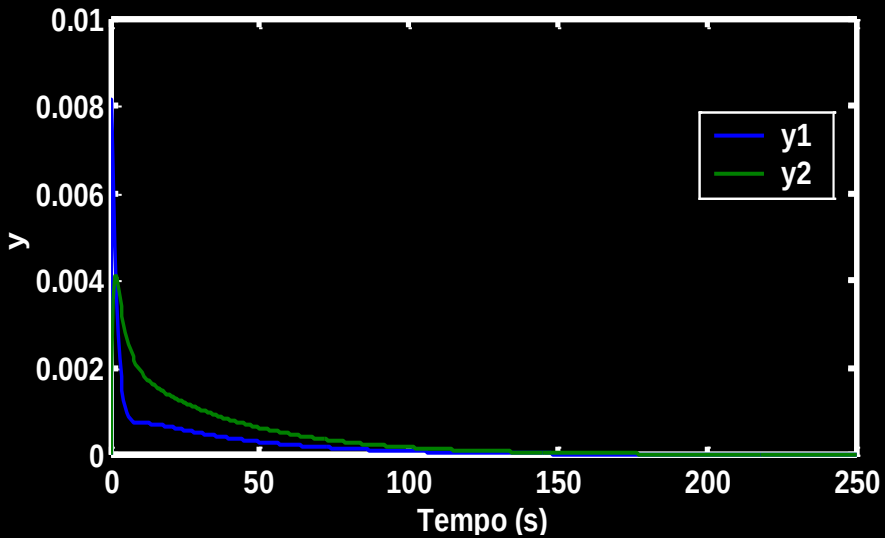


Ser, P=M, C/Obs M - CO

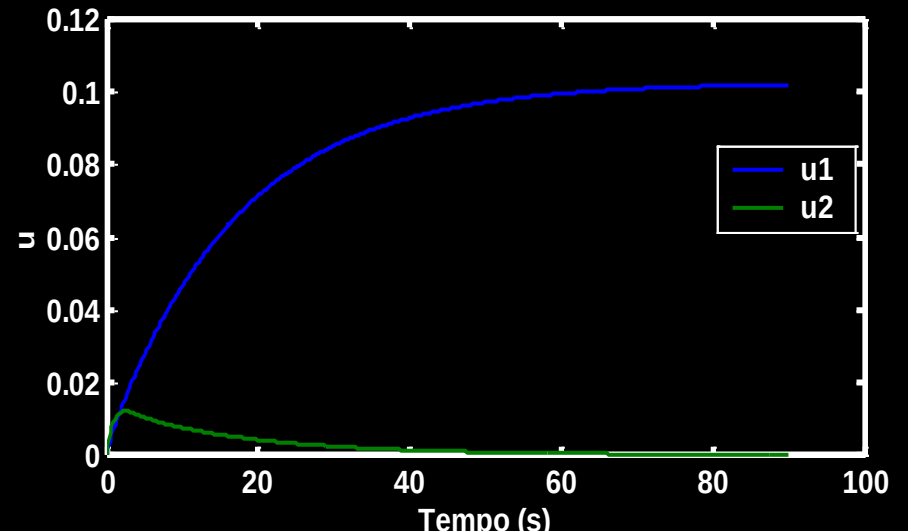
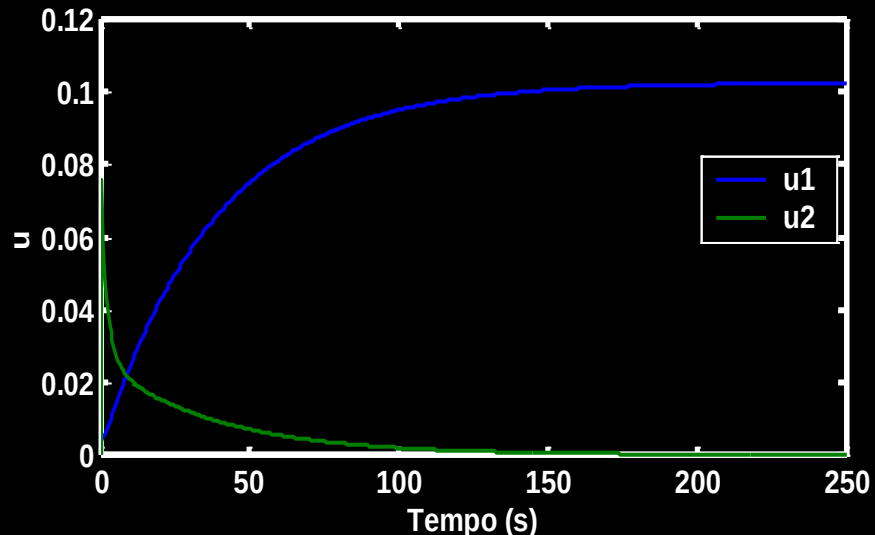
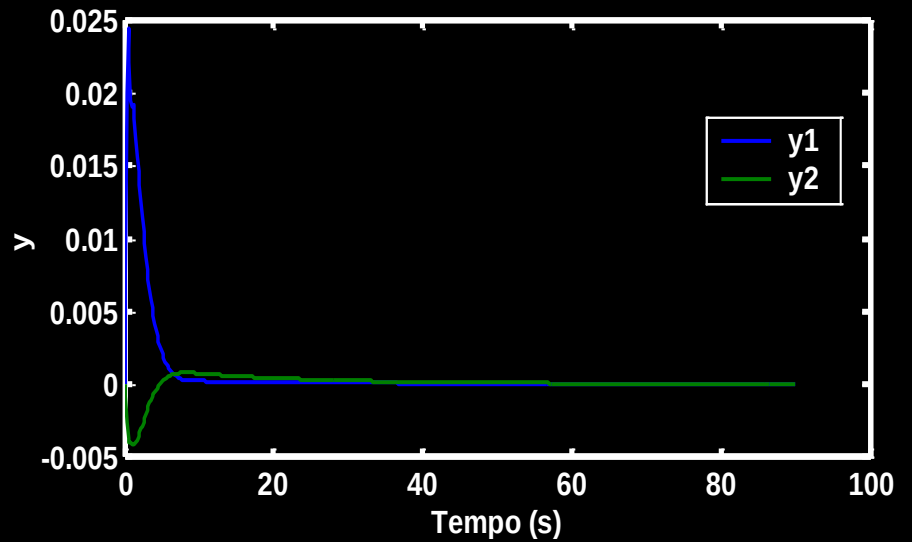


Resultados

Ser, P=M, S/Obs - CP

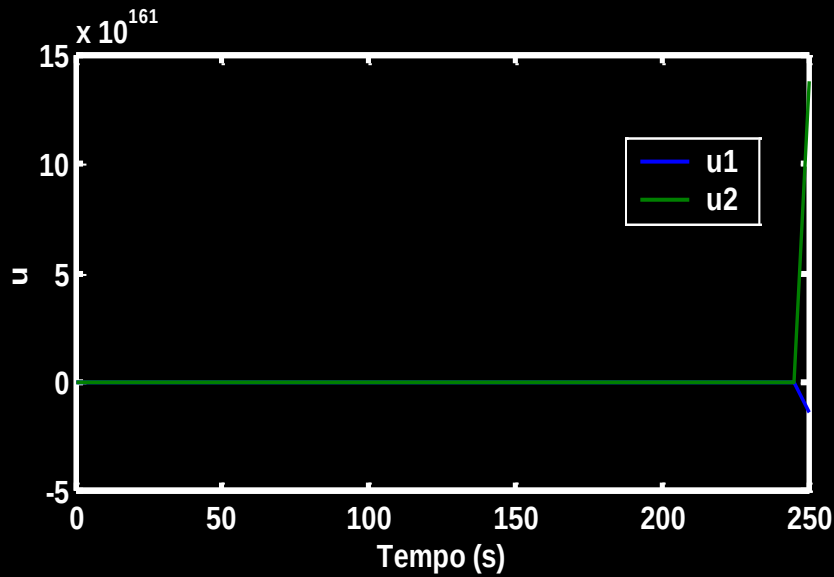
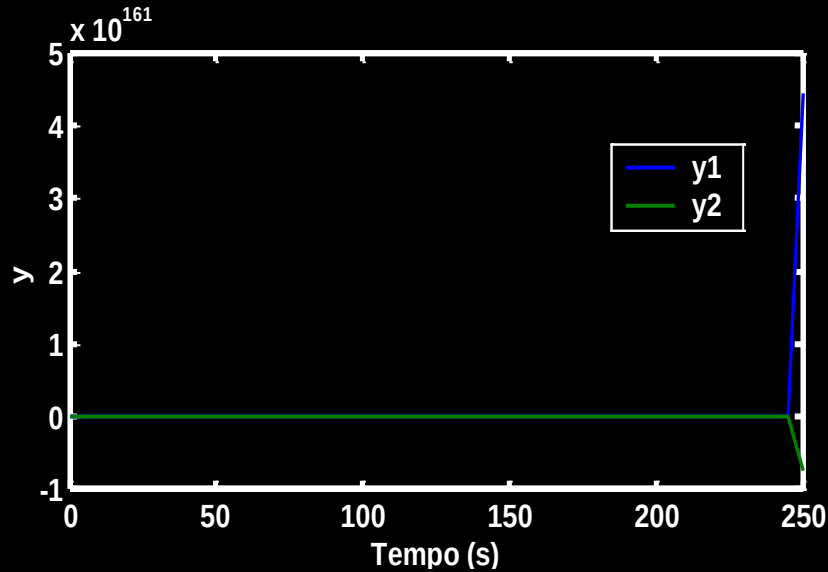


Ser, P=M, S/Obs - CO

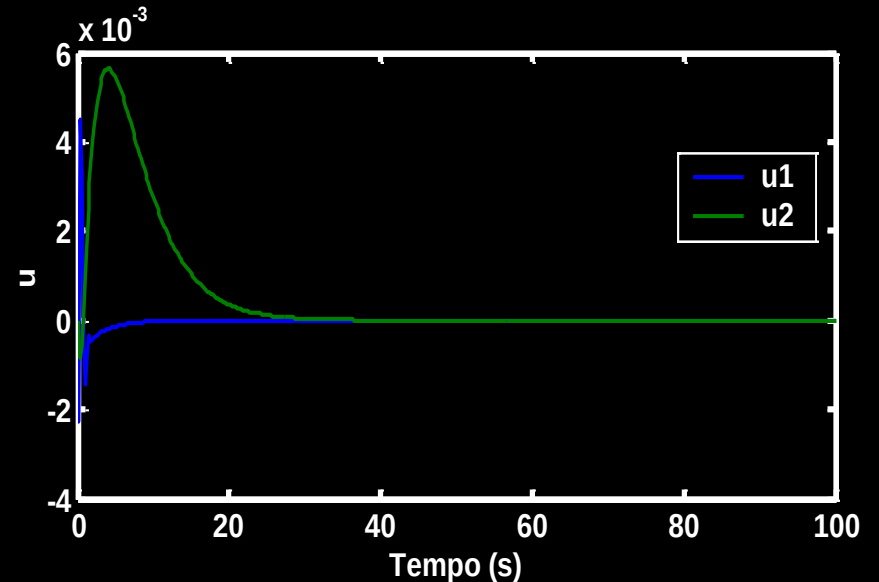
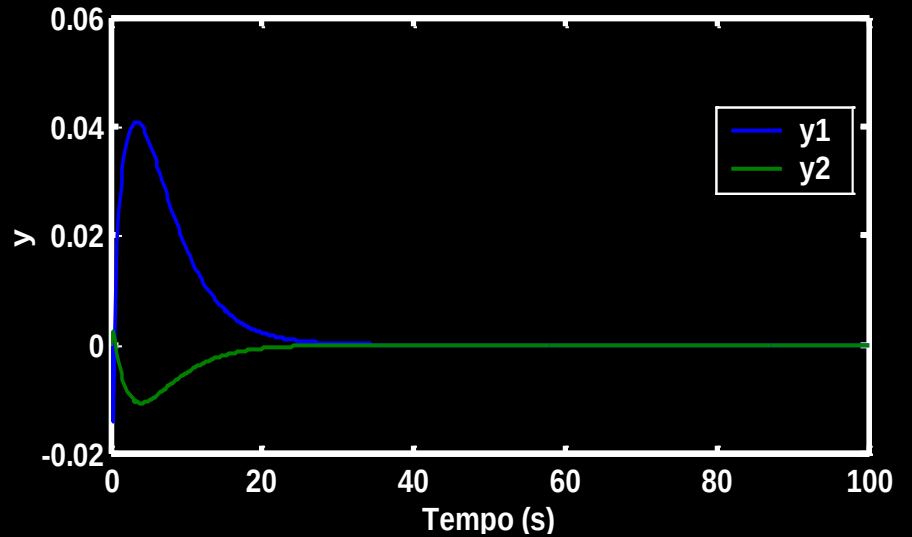


Resultados

Reg, DPM, C/Obs P - CP

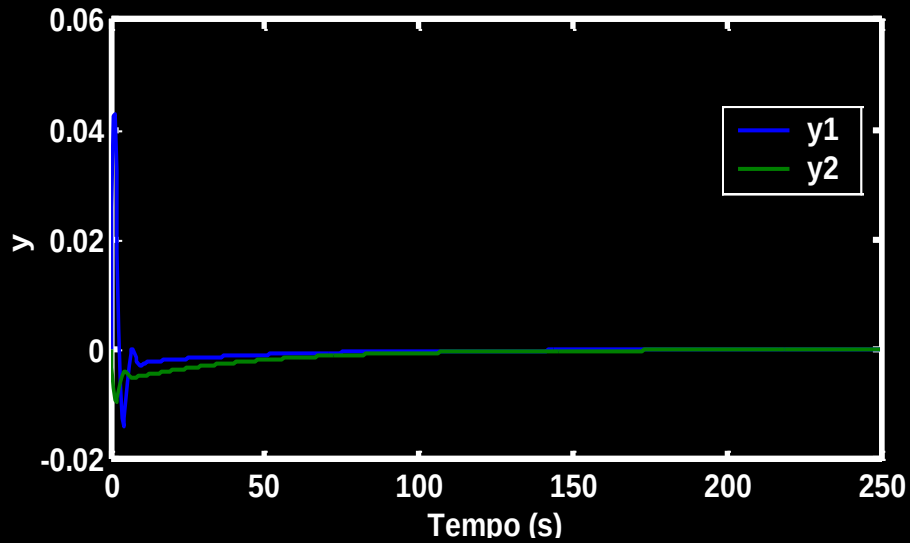


Reg, DPM, C/Obs P - CO

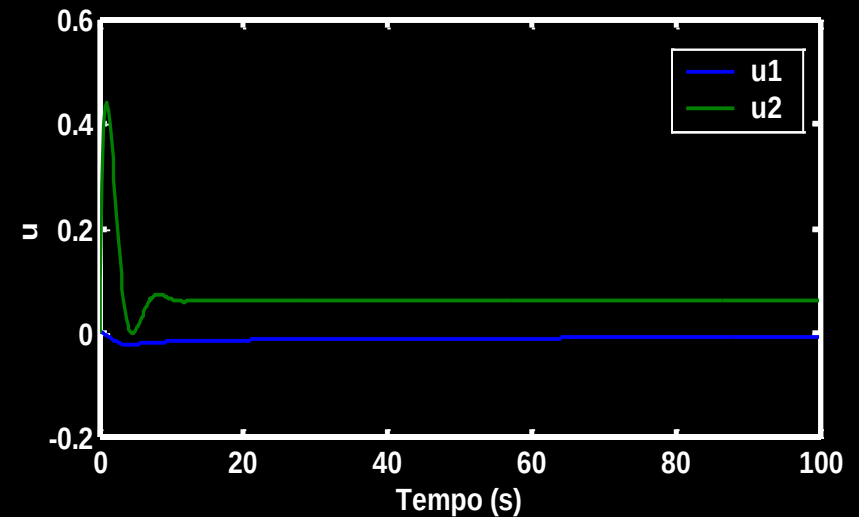
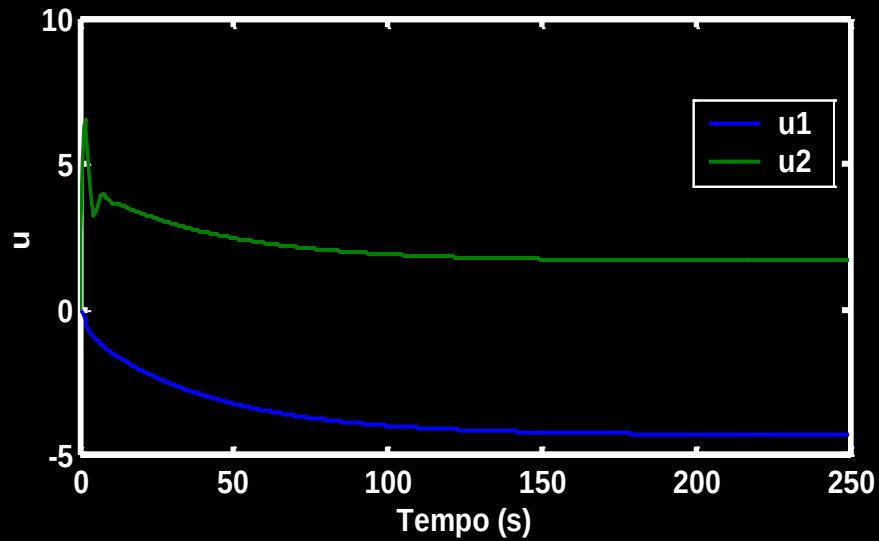
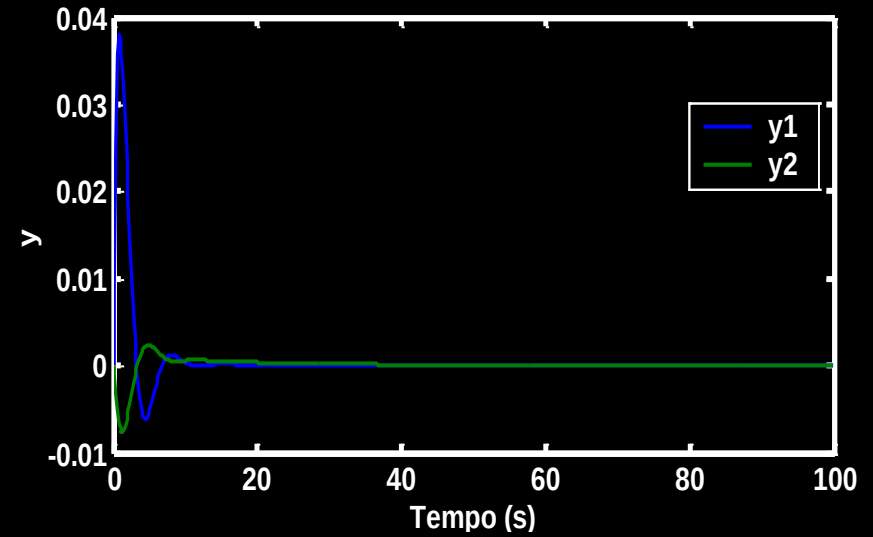


Resultados

Ser, DPM, C/Obs M - CP

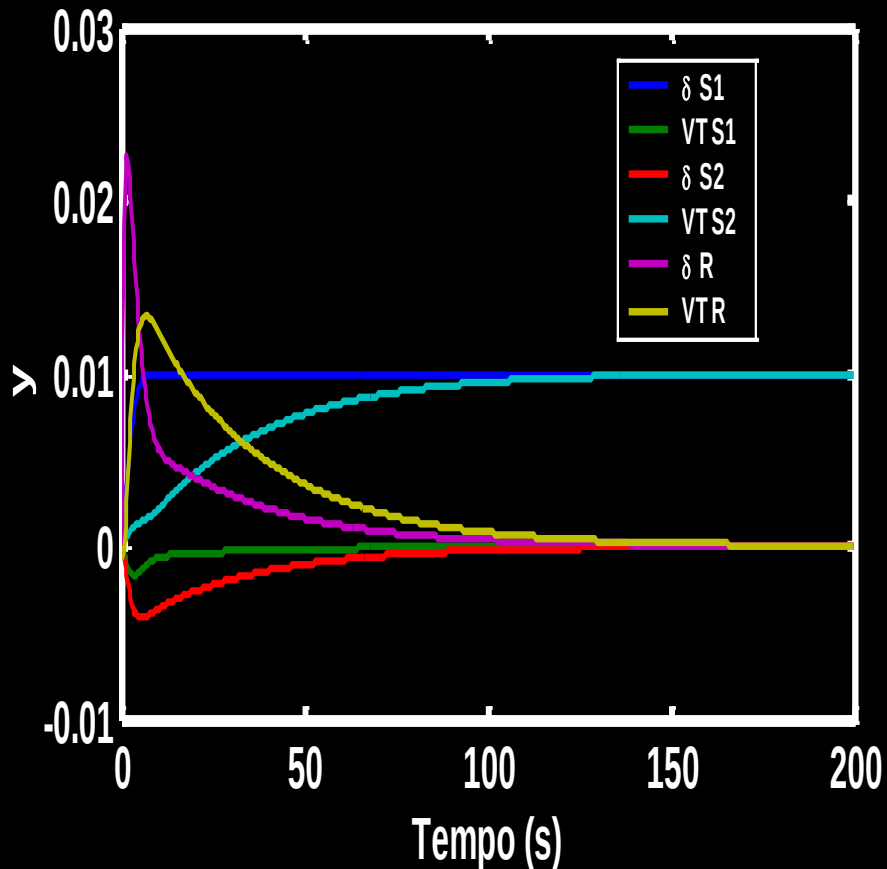


Ser, DPM, C/Obs M - CO

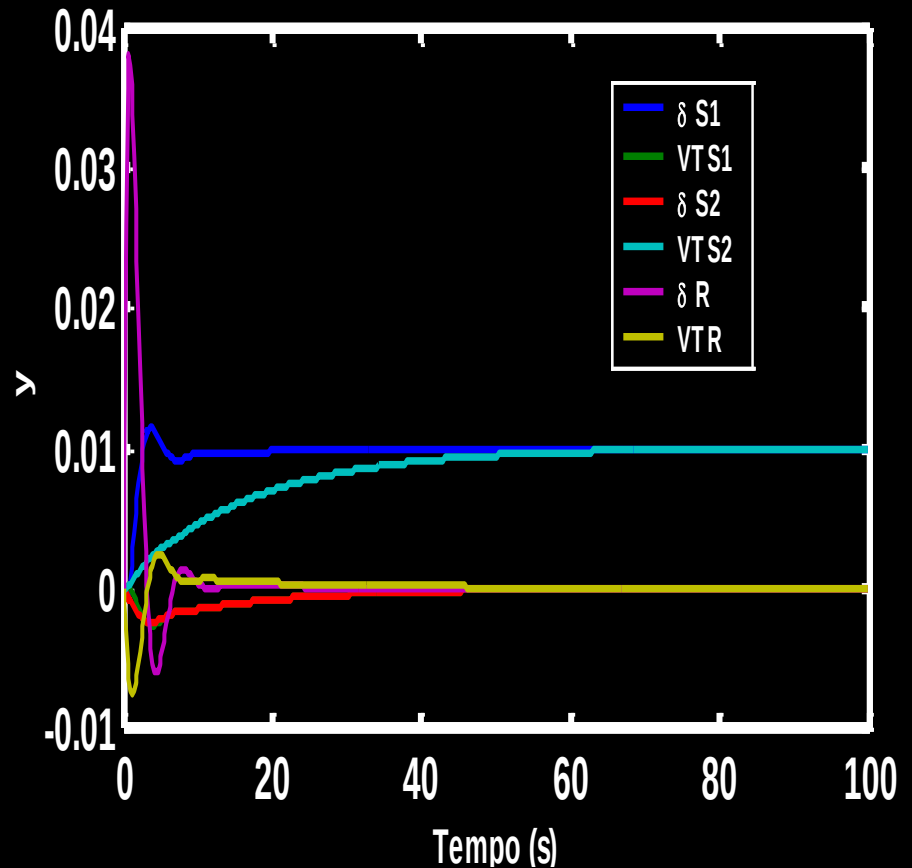


Resultados

Colocação de Pólos



Controle Ótimo



Resultados

Parâmetros de Projeto

Parâmetro	Valor/Unidade
k	1
v	0
x	[0.01]
e	0
w	[0.01 0; 0 0.01]
r	[0.01 0]; [0 0.01]; [0.01 0.01]
M	[1 0]; [5]; [4]; [3]; [1 2 3]; [3 4 5]; [5 4 3]; [10 4 6]; [10 3 2]
N	50, 40, 20, 10, 5
Q_{inc}	$I_0 I_0^* 10^{-1}$; [10 0 0 1]; [1 0; 0 10]
R_{inc}	$I_0 I_0^* 10^{-1}$; [10 0 0 1]; [1 0; 0 10]

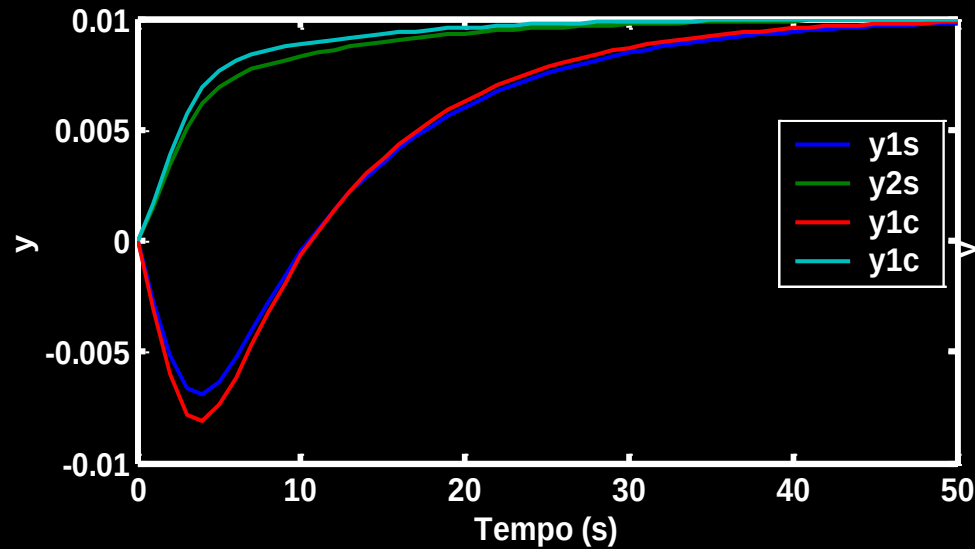
MPC

Restrições

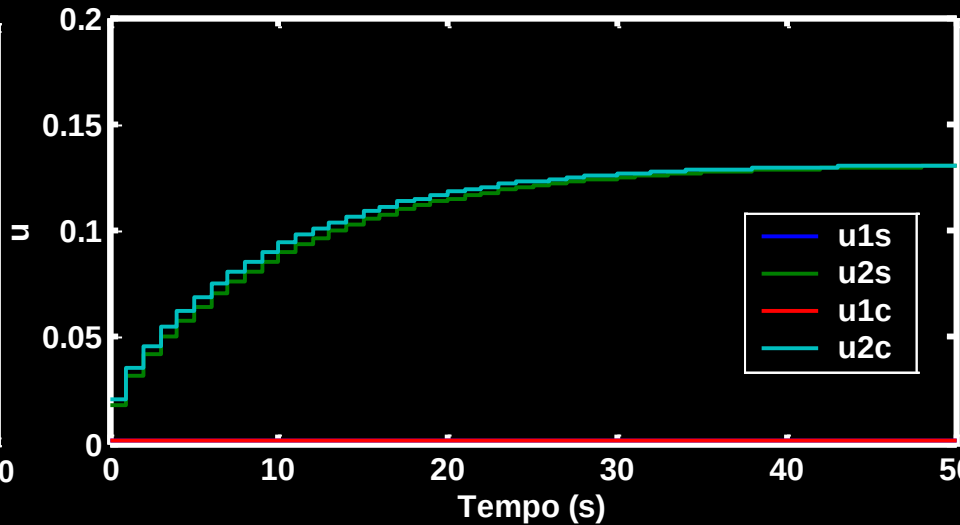
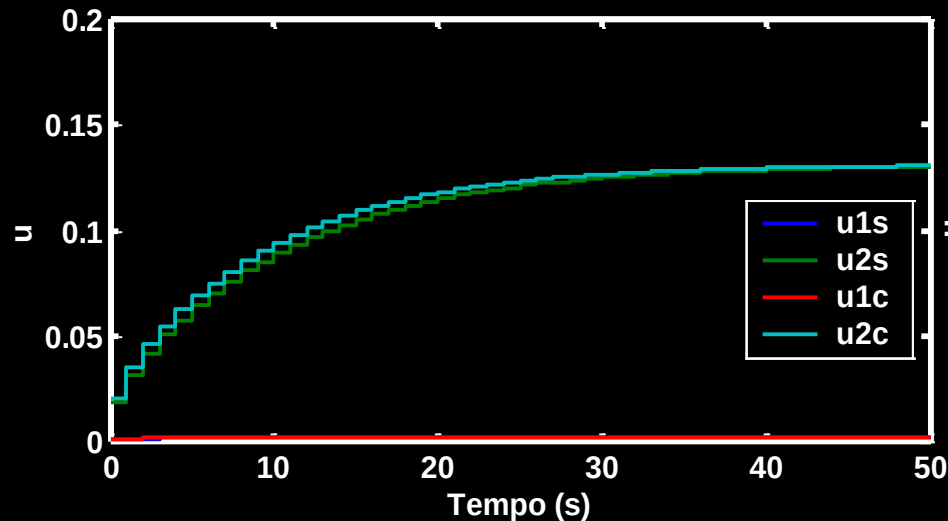
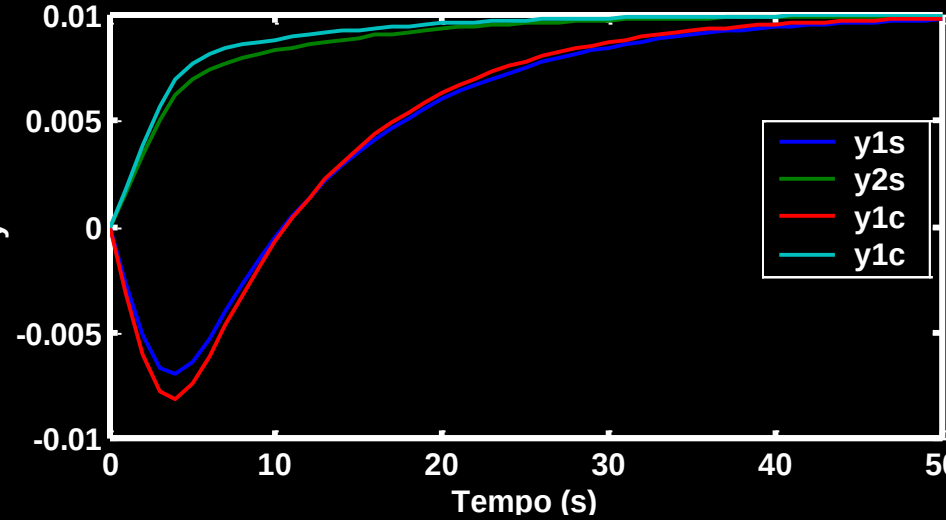
Variável	Valor Máximo	Valor Mínimo	Máxima Variação
δ	0.52	-0.52	-
ΔT	0.1	-0.1	-
ΔT	0.1	0.1	0.01
ΔF	4.5	-4.5	0.03

Resultados

Servo, P=M, S/ Obs.

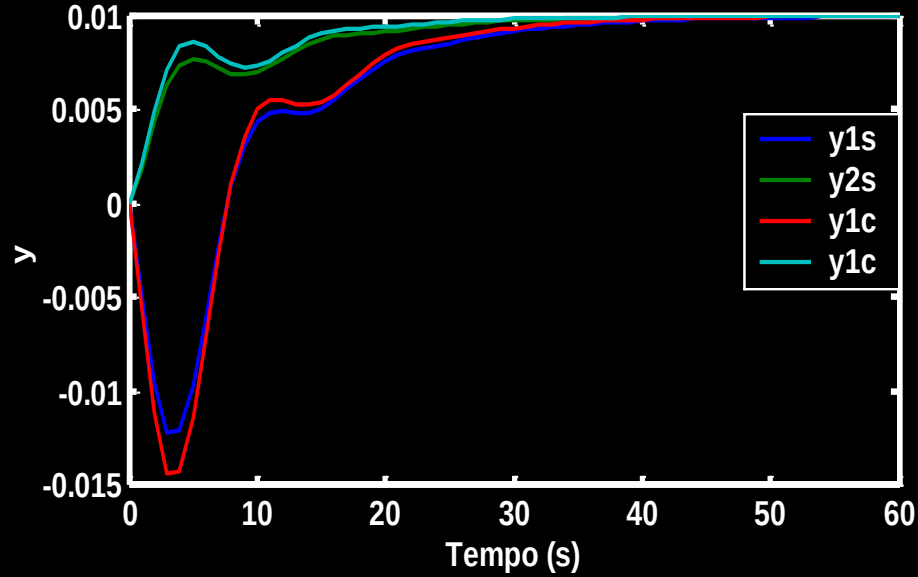


Servo, P=M, C/ Obs.

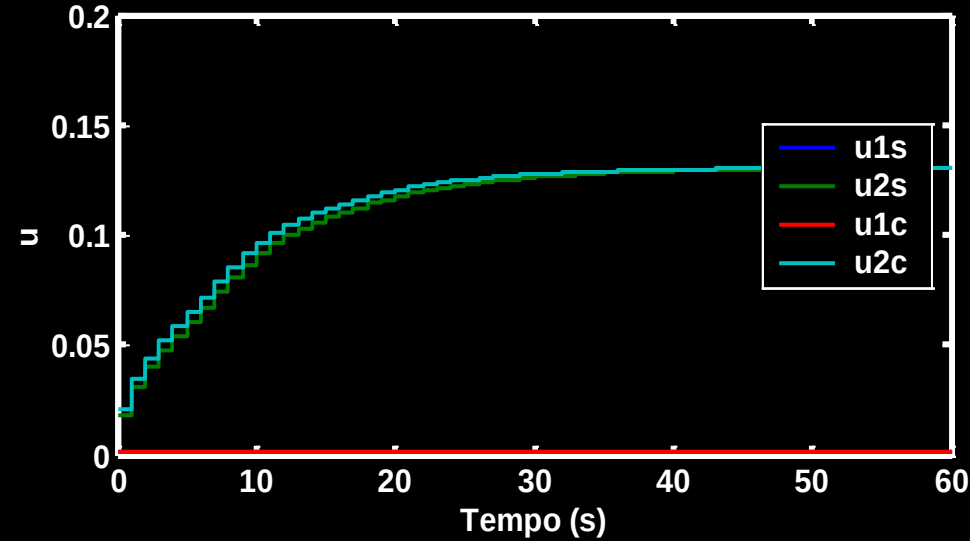
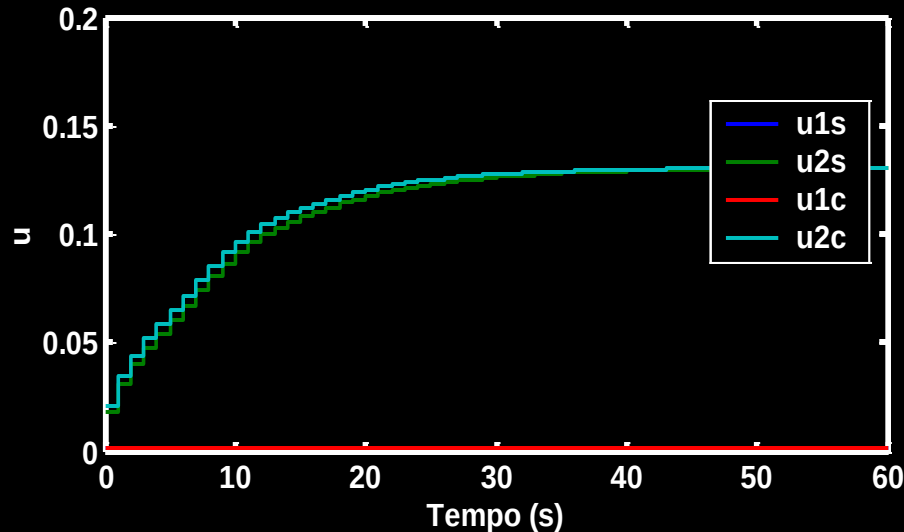
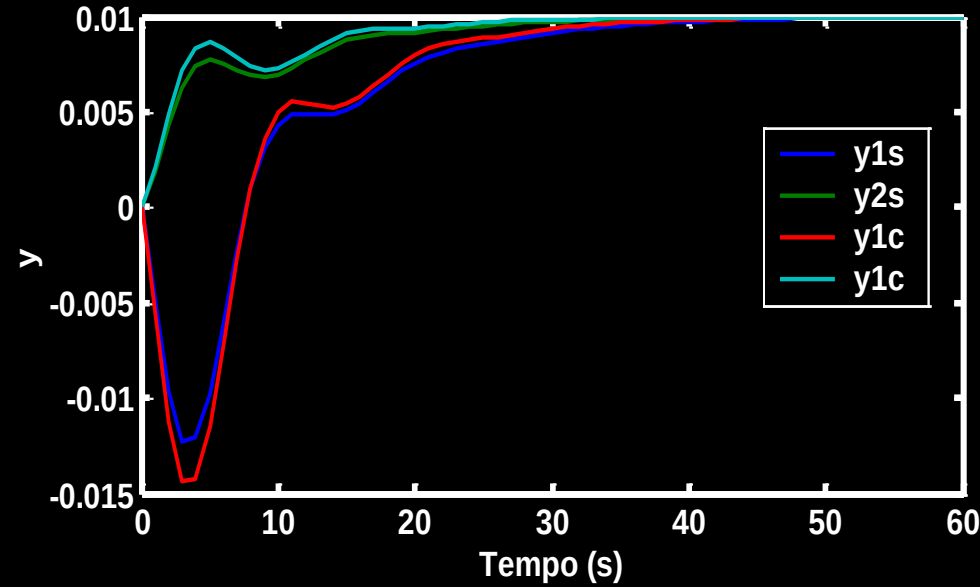


Resultados

Servo, Desvio P/M, S/ Obs.

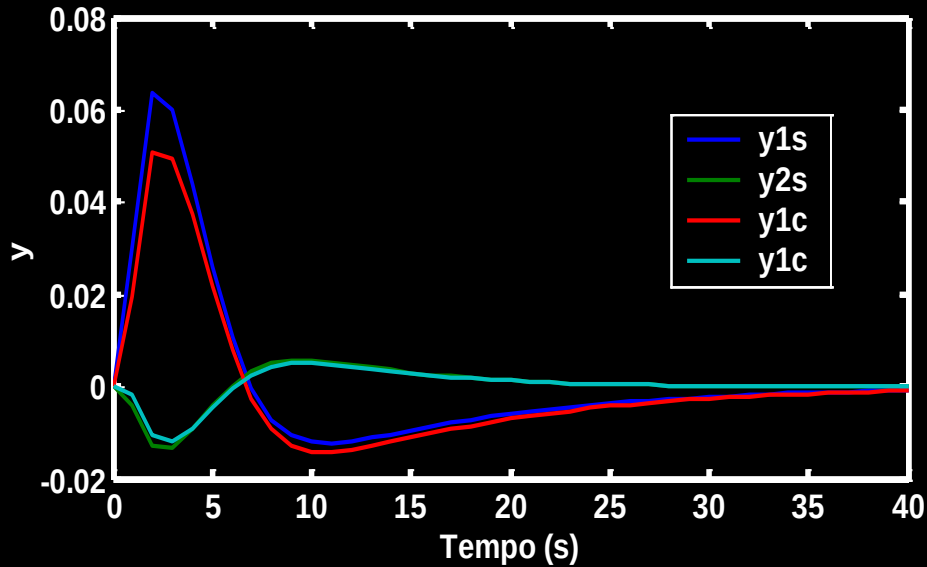


Servo, Desvio P/M, C/ Obs.

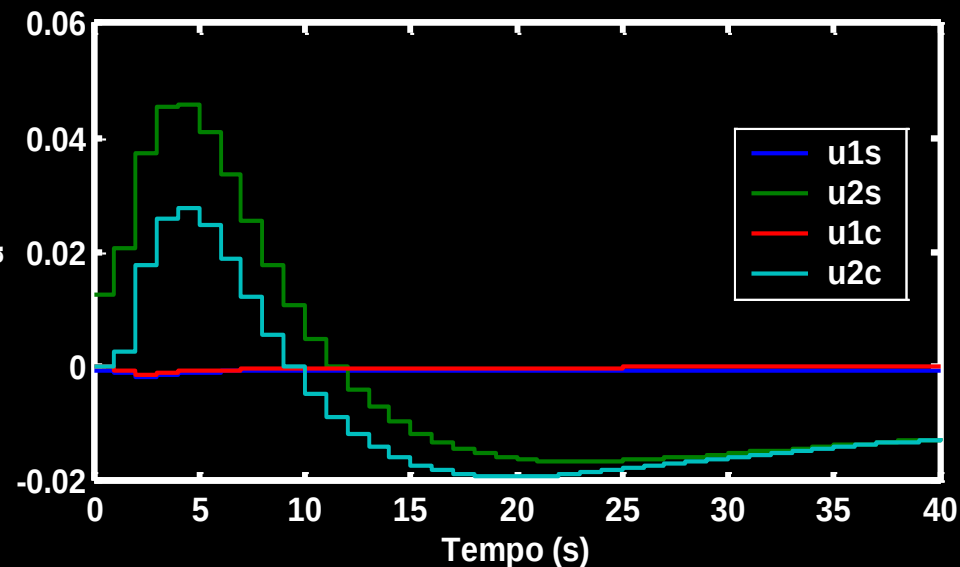
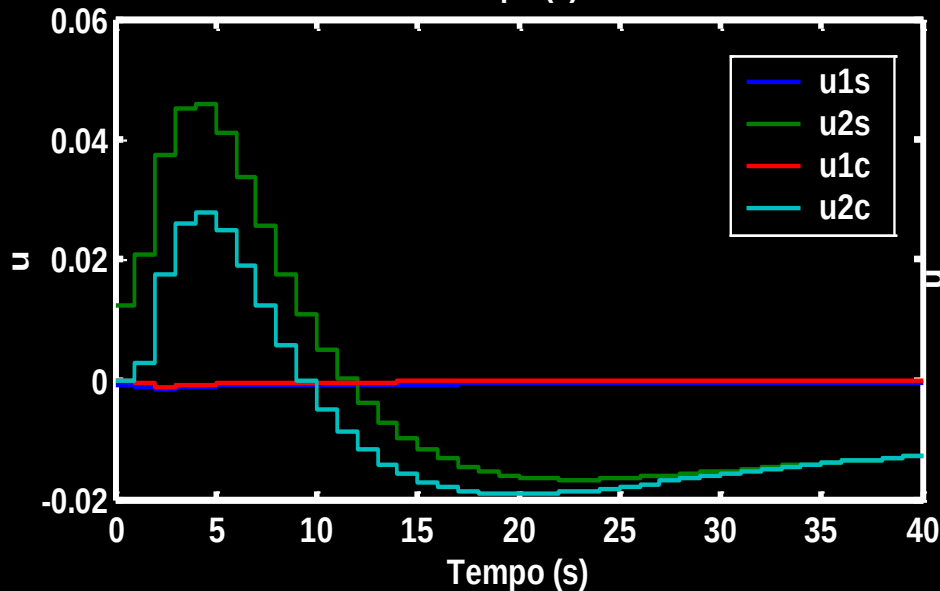
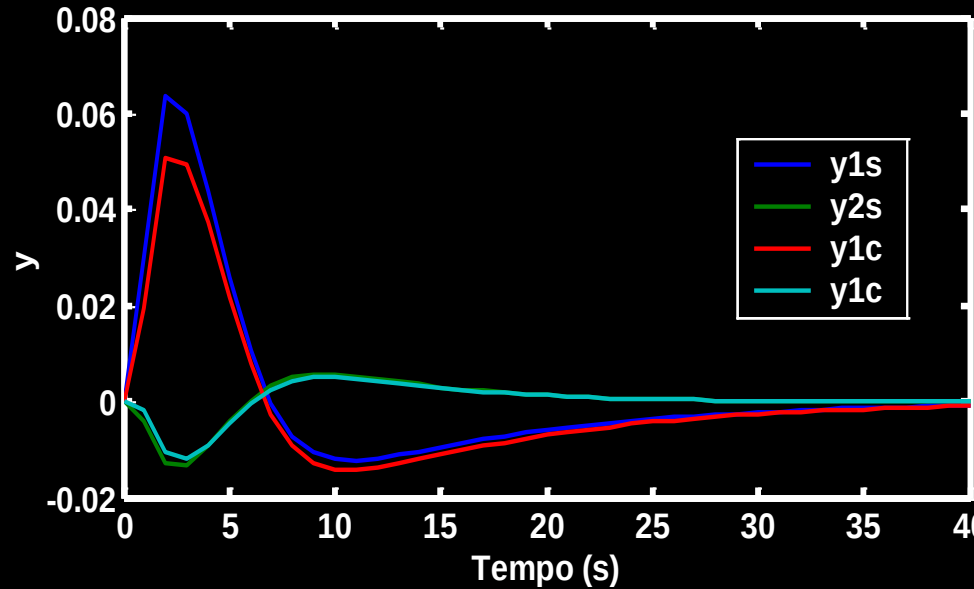


Resultados

Regulador, $P=M$, S/ Obs.

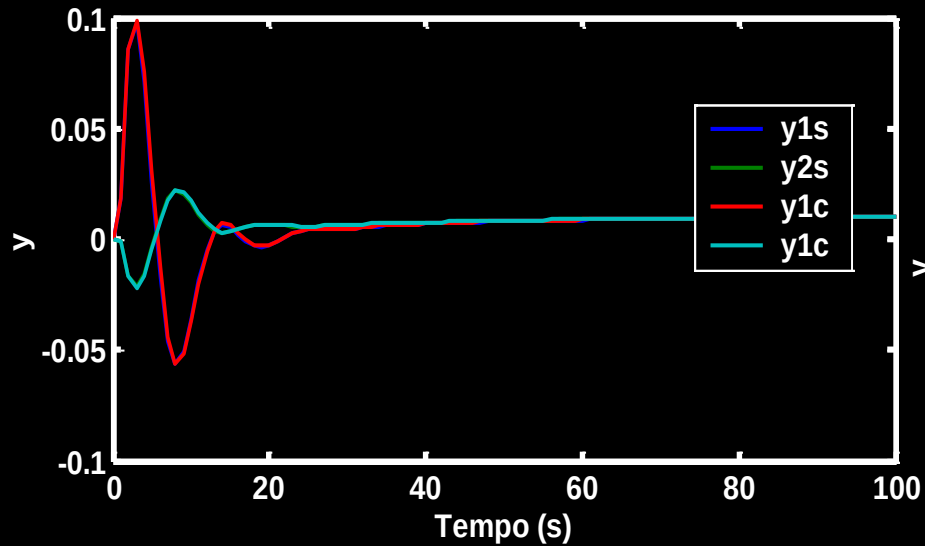


Regulador, $P=M$, S/ Obs.

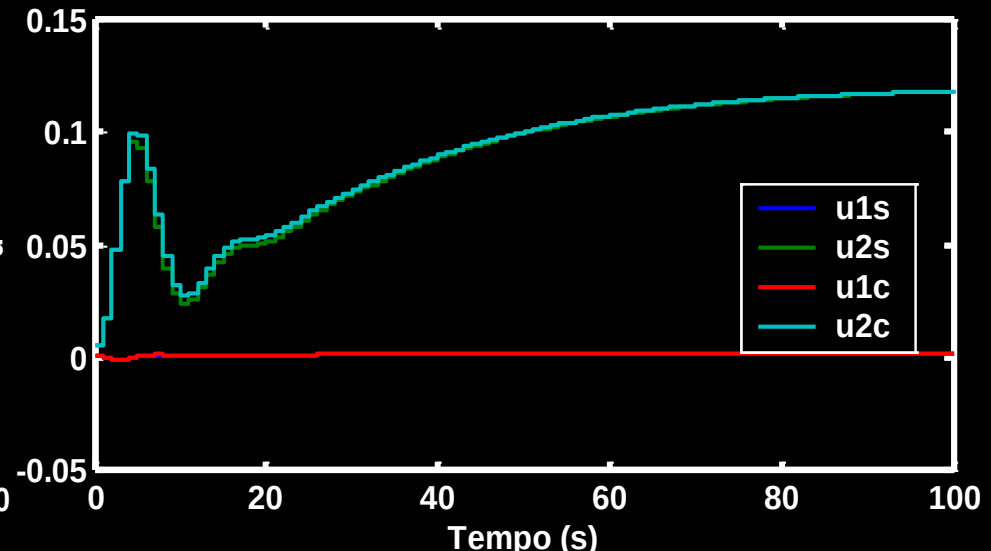
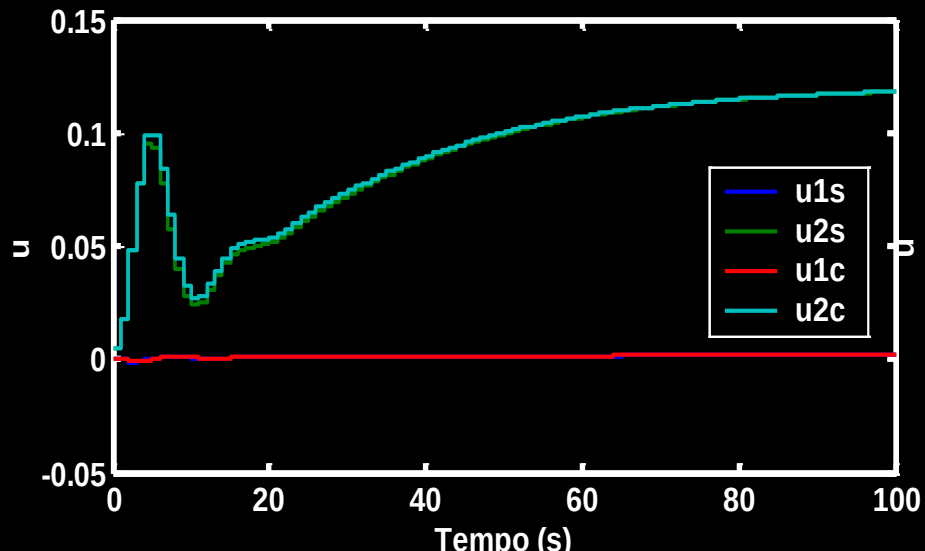
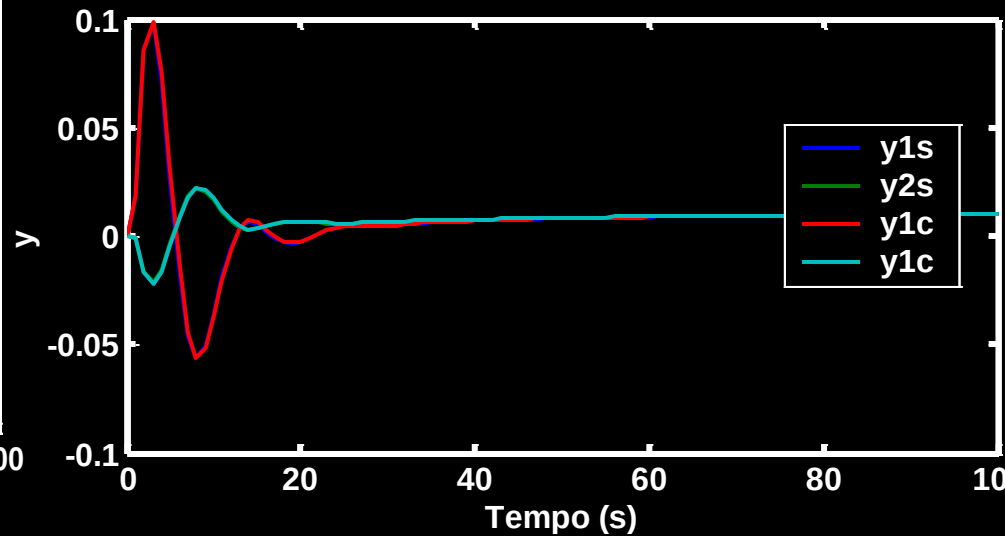


Resultados

Regulador, Desvio P/M, S/ Obs.

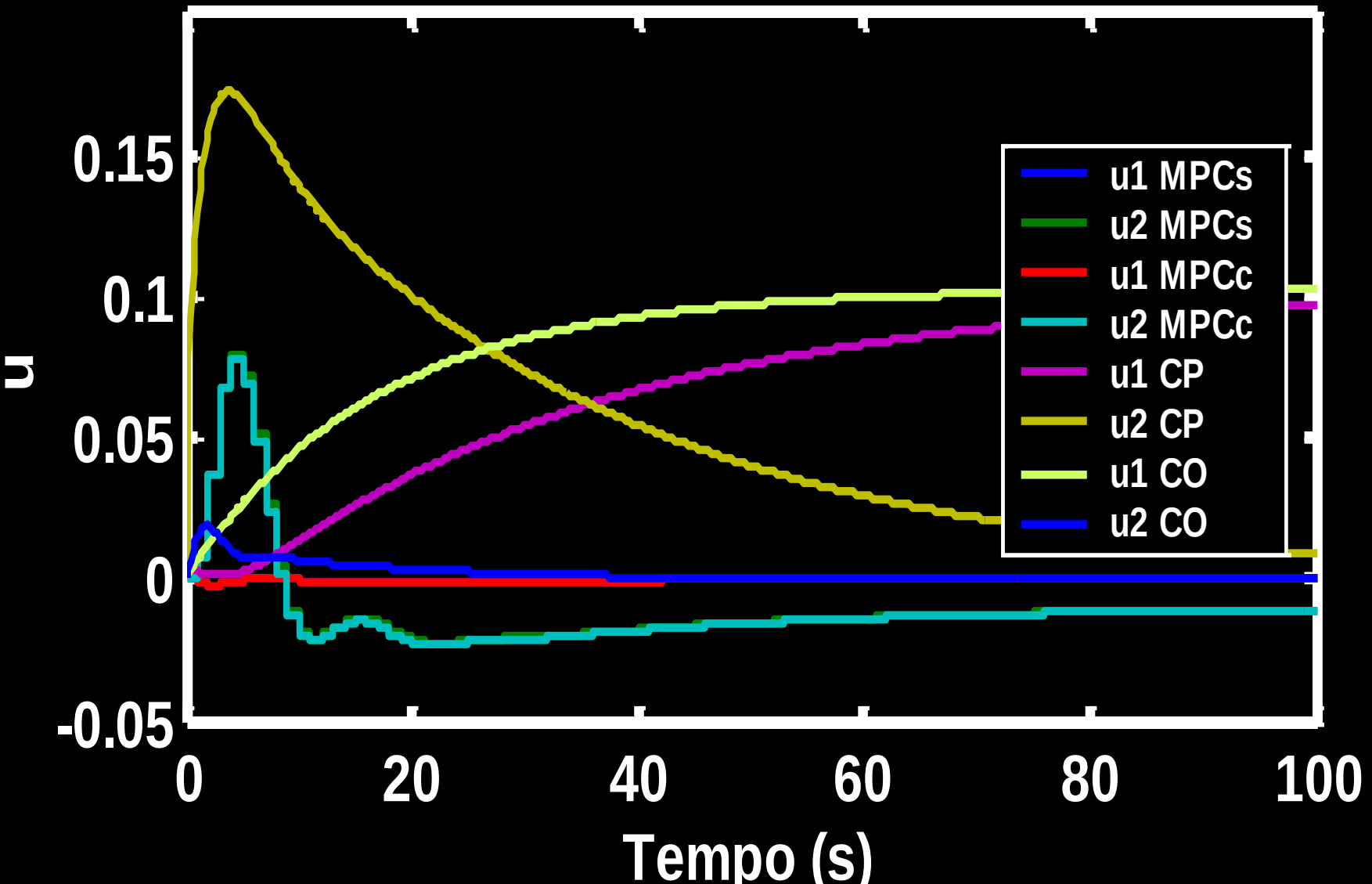


Regulador, Desvio P/M, C/ Obs.



Resultados

Esforço das variáveis manipuladas



CONCLUSÕES

Conclusões

Estudo do Processo

- Atuação dos reguladores: condições e características;
- *Offset*;
- Laço de velocidade e de carga;
- Parâmetros linearizados e K_1 ;
- Dinâmica do sistema submetido à variações;
- O processo sem regulação é instável em MA.
- O processo com as alterações propostas é estável em MA, controlável e observável;
- Desvio planta/modelo.

Conclusões

Estudo de controle por colocação de pólos

- Variações em x_3 .
- Tentativa e erro.
- Estudo da planta com controladores atuais.
- Saídas para S e R sem observador e com $P=M$: estáveis.
- Saídas para S e R com Observadores e $P=M$: estáveis.
- Esforço de u para L em qualquer caso.
- Esforço de u para R do observador mínimo e com $P=M$.
- Saídas para R em qualquer caso com desvio P/M : instável.
- *Offset* e *overshoot*.
- Sensibilidade e Localização.

Conclusões

Estudo por Controle Ótimo

- Saídas estáveis para todos os casos.
- Tempo de EE reduzido.
- *Offset e overshoot.*
- Esforço de L : necessidade de mais pesquisa.
- Desvio planta/modelo: robustez.

Conclusões

Estudo do MPC

- Satisfatório para todos os casos.
- Esforço das variáveis manipuladas.
- Uso do MPC e melhoria nas respostas.
- Robustez.
- Facilidade de ajuste.
- Impacto da carga L .
- *Offset* e *overshoot*.
- Horizontes e as respostas obtidas.
- Indicado para implantação.

Conclusões

- Tempo de ciclo do programa e a dinâmica do sistema.

Não se preocupou durante este trabalho em se obter o melhor controle, mas sim apresentar a possibilidade de se atingir tal condição.

Logo, pode-se concluir que a alteração proposta é viável e a implantação de controle utilizando técnicas de controle moderno pode além de modernizar o processo, leva-lo a um melhor desempenho, contribuindo assim significativamente para o retorno técnico e financeiro.

Conclusões

Proposta para trabalhos futuros

- Estudo do sistema buscando a construção da matriz de sensibilidade: localização dos pólos e as saídas do sistema.
- Estudo da planta utilizando técnicas de identificação do modelo.
- Estudo utilizando técnicas de identificação e controle não linear.

AGRADECIMENTOS

“...DEUS ESCOLHE O MELHOR
DOS MUNDOS DENTRE TODOS
AQUELES QUE SE
APRESENTAM COMO
POSSÍVEIS...”

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ

(1646-1716)

ESCLARECIMENTOS